

# 저감속 회수장비 시험조건에 따른 초음속 시험탄 감속특성에 대한 수치해석적 연구

송민섭<sup>1)</sup> · 김재훈<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

<sup>2)</sup> 충남대학교 기계공학과

## Numerical Studies on the Deceleration Characteristics of Supersonic Projectile According to the Test Condition Parameters in a Soft Recovery System

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

<sup>1)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

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

(Received 18 February 2020 / Revised 6 July 2020 / Accepted 14 August 2020)

### Abstract

Numerical analyses were performed using a one-dimensional Euler equation and Godunov Harten-Lax-Van Leer(HLL) Riemann solver in order to study the deceleration characteristics of a 155 mm projectile in a soft recovery system. The soft recovery system consisting of a series of pressure tubes is a system that decelerates the test projectile fired at supersonic speed using a high-pressure gas and filled water inside. Therefore, depending on the gas pressure and the amount of water filling, the deceleration and the exit velocity of the test projectile inside the pressure tube are determined. In this paper, the deceleration characteristics of the test projectile were analyzed according to the gas pressure and water mass filled.

Key Words : Soft Recovery System(저감속 회수장비), Deceleration(감속), HLL Riemann Solver(HLL 리만 솔버)

### 1. 서론

최근 방산 선진국에서 개발중인 지능탄에 대한 내 고충격 시험평가를 위해 저감속 회수장비(soft recovery

system)를 이용한 연구가 진행되어 왔다<sup>[1-3]</sup>. 저감속 회수장비는 가속장비에서 초음속으로 발사된 시험체가 장착된 시험탄을 압력관내의 가스와 물을 이용하여 감속시키는 장비이다<sup>[4-5]</sup>. 저감속 회수장비내 격막과 피스톤을 이용하여 충전된 가스와 물은 시험탄의 감속 특성에 직접적인 영향을 미치게 되며 이에 대한 연구가 요구되었다.

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

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

초음속으로 발사되어 압력관 내부로 진입한 시험탄의 전방에는 공기 분자의 밀도가 높아지는 상태, 즉 압력이 높은 상태가 된다. 만약 시험탄의 이동 속도가 공기 분자가 움직이는 속도(음속)보다 빠를 경우 공기의 평형이 이루어지기 전에 공기의 압축이 반복되면서 압력이 계속 상승하여 충격파 형태를 갖게 된다. 충격파는 시험탄의 속도보다 빠르게 이동하여 격막 또는 피스톤에 반사되어 다시 시험탄의 전방에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 상기와 같이 충격파가 발생하는 저감속 회수장비 압력관내에서의 시험탄 이동을 수치해석적으로 모사하기 위한 이론적 모델을 제시하고, 시험 조건 변수에 따른 시험탄의 감속특성을 분석하였다. 저감속 회수장비는 압력관 직경대비 길이가 길기 때문에 1차원적으로 해석이 가능하며 1차원 오일러 방정식을 기반으로 시험탄의 초기속도, 가스압력 및 물 충전량을 해석조건으로 고려하였다<sup>[6]</sup>.

## 2. 수치해석 모델

### 2.1 저감속 회수장비 구성

초음속으로 발사된 시험탄을 감속시켜 회수하는 저감속 회수장비는 Fig. 1 및 Table 1과 같이 3개 구간으로 구분할 수 있다. 발사된 시험탄은 대기압으로 이루어진 PET(Projectile Entrance Tube)구간으로 진입하며, HPT(High Pressurized Tube) 구간에는 격막과 피스톤에 의해 구성된 압력경계 내부에 가스가 충전된다. WFT(Water Filled Tube) 구간에는 물이 충전되어 충격파에 의해 전단된 피스톤이 물의 마찰력에 의해 고속으로 이동하지 못하며, 이에 따라 시험탄을 최종적으로 감속시키는 역할을 한다.

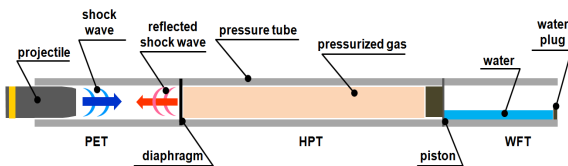


Fig. 1. Schematic figure of the soft recovery system

상기와 같이 164 m의 저감속 회수장비를 수치해석적으로 모사하기 위해 유한개의 격자를 구성하였으며, Fig. 2와 같이 HPT(High Pressurized Tube) 구역의 압력

경계를 구성하는 격막이나 피스톤이 파열되기 전에는 해석 영역에 포함시키지 않도록 구성하였다. 시험탄 후방영역에서의 유동은 시험탄 감속에 영향을 미치지 않는 것으로 가정하였다.

Table 1. Length of the soft recovery system sections

Section	Length(m)
PET(Projectile Entrance Tube)	30
HPT(High Pressurized Tube)	103
WFT(Water Filled Tube)	31

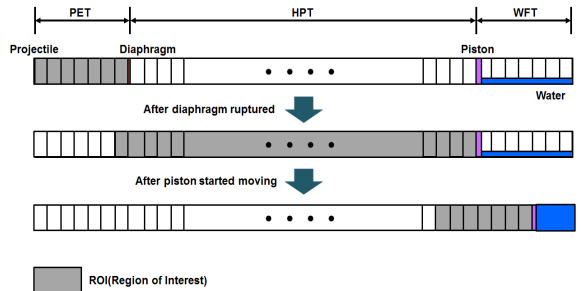


Fig. 2. Change of computational domain

### 2.2 지배방정식

저감속 회수장비내의 유동은 1차원 비점성 압축성으로 가정하여 식 (1)과 같이 오일러 방정식을 지배방정식으로 사용하였다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

식 (1)의 보존변수 벡터  $U$ 와 유량벡터  $F$ 는 식 (2)와 같다.  $\rho$ 와  $p$ 는 유동의 밀도와 압력이며,  $u$ 는 진행방향의 유동속도,  $E$ 는 내부에너지를 나타낸다.

$$U = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ E \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ (E+p)u \end{bmatrix} \tag{2}$$

### 2.3 Godunov HLL Riemann 솔버

식 (1)을 수치적으로 해석하기 위해 Godunov HLL (Harten, Lax and van Leer) Riemann solver를 해석기법으로 적용하였다<sup>[7-9]</sup>. 충격파와 같이 유동에 불연속성이

포함되는 경우 초기치 불연속 문제인 Riemann solver를 적용할 수 있기 때문이다. Riemann solver는 지배방정식과 하나의 불연속을 중심으로 piecewise constant 데이터가 주어질 때 초기값 문제에 적용할 수 있다.

보존변수 U는 유량벡터를 piecewise constant로 가정하는 Godunov방법을 적용할 수 있다. 유한 체적의 경계면에서 근사 리만 해법인 HLL Riemann solver를 이용하여 유량 벡터 F를 계산하였다. Godunov scheme은 구간별로 constant한 값을 가진 유한 체적 시스템의 경계면에서 불연속 초기치 문제를 수치적으로 계산하게 된다. Godunov 방법은 수치적 해 계산이 완료되면 다음 time step으로 넘어가기 전에 다시 구간 평균한다. Godunov 기법에 따라 보존변수를 이산화된 적분 형태로 표현하면 식 (3)과 같다.

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[ F_{i-\frac{1}{2}} - F_{i+\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

수치해석에서 Time step( $\Delta t$ )은 Courant-Friedrichs-Lewy 수( $C_{eff}$ )과 격자의 크기( $\Delta x$ ), 및 최대 파속도( $S_{max}$ )를 이용하여 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta t = \frac{C_{eff}\Delta x}{S_{max}^n} \quad (4)$$

HLL Riemann 해의 구조는 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 파속인  $S_L$ 과  $S_R$ 에 의해 3개의 구간으로 나눌 수 있으며, 각 구간에서 보존변수가 계산되면 HLL Riemann 해는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

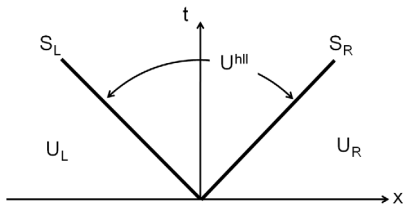


Fig. 3. Approximate state for HLL Riemann solver

$$F_{i+\frac{1}{2}}^{hll} = \begin{cases} F_L & \text{if } 0 \leq S_L \\ \frac{S_R F_L - S_L F_R + S_L S_R (U_R - U_L)}{S_R - S_L} & \text{if } S_L \leq 0 \leq S_R \\ F_R & \text{if } 0 \geq S_R \end{cases} \quad (5)$$

#### 2.4 경계 조건

저감속 회수장비내에서 경계조건은 반사가 발생하는 벽면 조건과 반사가 일어나지 않는 통과조건으로 구분된다. 벽면 조건은 물리적으로 고체 벽면을 구성하는 시험탄의 전방, 격막, 및 피스톤이 해당되며 통과 조건은 저감속 회수장비 WFT(Water Filled Tube) 끝단이 해당된다. 충격파가 격막 또는 피스톤에 입사되는 경우에는 반사충격파가 발생하며 벽면이  $u_{wall}$ 이라는 속도로 이동하는 경우에 반사 경계조건은 식 (6)과 같다. 통과 경계 조건은 식 (7)과 같으며, M은 유동장의 격자를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \rho_{M+1}^n &= \rho_M^n \\ u_{M+1}^n &= -u_M^n + 2u_{wall} \\ p_{M+1}^n &= p_M^n \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \rho_{M+1}^n &= \rho_M^n \\ u_{M+1}^n &= u_M^n \\ p_{M+1}^n &= p_M^n \end{aligned} \quad (7)$$

#### 2.5 충격파 압력

Godunov HLL Riemann solver를 적용하기 위해서는 초기조건으로 불연속성이 만족되는 보존변수가 요구되므로 첫 번째 격자에 시험탄이 진입하였을 때 형성되는 충격파 압력과 밀도, 유동속도를 제공해야 한다. 정지된 상태에서 충격파의 이동과는 달리 상기와 같이 초음속 시험탄이 정지된 유체내로 진입할 경우에 압축성 공기 역학의 이동 충격파 이론에 따라 초기값을 계산할 수 있다<sup>[10]</sup>. Fig. 4와 같이 충격파의 전, 후 압력비( $p_2/p_1$ )는 식 (8)과 같이 충격파 속도를 이용하여 계산할 수 있으며, 충격파 속도는 식 (9)와 같이 정리할 수 있다. 이상기체 상태방정식 식 (10)에 충격파 후면의 속도인 시험탄의 속도를 적용하고 Rankine-Hugoniot 관계식인 식 (11)을 이용하면 식 (12)와 같이 시험탄 초기속도를 충격파 속도, 압력비, 및 비열비를 이용하여 표현할 수 있다.

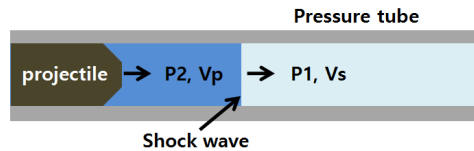


Fig. 4. Moving shock in pressure tube from projectile

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \left( \frac{S}{a} \right) - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \quad (8)$$

$S$ : Shock velocity  
 $a$ : Speed of Sound

$$S = a \sqrt{\left( \frac{\gamma+1}{2\gamma} \right) \frac{p_2}{p_1} + \left( \frac{\gamma-1}{2\gamma} \right)} \quad (9)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - \frac{v_p}{S} \quad (10)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma+1)p_2 + (\gamma-1)p_1}{(\gamma+1)p_1 + (\gamma-1)p_2} \quad (11)$$

$$V_p = \frac{V_s}{\gamma} \left( \frac{p_2}{p_1} - 1 \right) \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{p_2}{p_1} + \frac{\gamma-1}{\gamma+1}} \quad (12)$$

여기서,  $V_s$ 는 충격파의 속도,  $\gamma$ 는 비열비 1.4,  $p_2$ 와  $p_1$ 은 각각 충격파 후방과 전방에서의 압력이다. 식 (12)를 압력비  $p_2/p_1$ 에 대해 2차 방정식으로 정리하면 해를 계산할 수 있으며, 이를 통해 밀도비( $\rho_2/\rho_1$ )도 계산할 수 있다.

### 2.6 시험탄 및 피스톤 운동방정식

시험탄의 속도와 변위는 식 (13)와 같이 운동 방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$M_{proj} \frac{d^2x}{dt^2} = -(P_f - P_{atm})A_{proj} \quad (13)$$

여기에서  $M_{proj}$ 은 시험탄의 질량, 오일러 방정식으로 부터 계산되는  $P_f$ 는 시험탄 전방에 작용하는 압력,  $P_{atm}$ 은 시험탄 후방에 작용하는 대기압이고  $A_{proj}$ 는 시험탄의 단면적이다. 이때 시험탄에 작용하는 마찰력은 고려하지 않는다.

피스톤의 경우 충격파에 의해 전단되어 고속으로 이동을 시작하면 Fig. 5와 같이 WFT(Water Filled Tube)구간의 충전된 물도 밀려나가면서 피스톤 앞에 물기둥(water column)이 형성된다고 가정할 수 있다. 피스톤과 형성된 물기둥에 작용하는 힘은 식 (14)와 같이 표현된다.



Fig. 5. Force acting on the piston and water column

$$(M_{pist} + M_{water}) \frac{d^2x}{dt^2} = P_{pist}A_{pist} - F_{fric} \quad (14)$$

$M_{pist}$ 와  $M_{water}$ 는 피스톤 질량과 물기둥이 형성된 영역의 질량을 나타내며,  $P_{pist}$ 는 피스톤 후방에서 충격파에 의해 가해지는 압력이며,  $A_{pist}$ 는 피스톤의 단면적을 나타낸다.  $F_{fric}$ 은 피스톤 및 형성된 물기둥과 압력관 내부의 마찰력을 나타낸다. 피스톤의 마찰력은 식 (15)에 의해 계산하였으며 물기둥에 의한 마찰력은 식 (16)과 같이 관내에 흐르는 난류 유동에 의한 마찰력의 계산식을 이용하였다. 마찰계수  $f_{fric}$ 는 물의 Reynolds 수에 따라 식 (17)과 같이 적용하였다.

$$F_{pist} = \mu m_{pist}g \quad (15)$$

$$F_{water} = A_{sur}Kf_{fric} = (2\pi RL) \left( \frac{1}{2} \rho \langle v \rangle^2 \right) f_{fric} \quad (16)$$

$$Re < 2100 : f_{fric} = \frac{16}{Re}$$

$$2.1 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^6 : \frac{1}{\sqrt{f_{fric}}} = 4.0 \log_{10} Re \sqrt{f_{fric}} - 0.4$$

$$4 \times 10^6 \leq Re \leq 1 \times 10^8 : \frac{1}{\sqrt{f_{fric}}} = 3.6 \log_{10} \frac{6.9}{Re} \quad (17)$$

### 3. 시험 조건별 수치해석 결과 및 고찰

상기의 수치해석 모델을 이용하여 시험조건에 따른 시험탄의 감속특성을 분석하기 위해 Table 2와 같이 시험탄 초기속도, 가스압, 및 물 충전량 조건을 이용하였다.

수치해석을 위해서 Fig. 2와 같이 유한개의 격자를 구성하여 시험탄의 이동을 모사하기 때문에 격자 개수에 대한 민감도 분석을 수행하였다.

시험탄 중량과 초기속도는 155 mm 양산탄 기준으로 설정하였으며, 가스압과 물 충전량은 초기 해석을

근거로 하여 유의미한 비교가 될 수 있는 값을 선택 하였다.

저감속 회수장비 압력관의 내경은 156 mm, HPT(High Pressurized Tube)의 전방과 후방에 설치되는 격막 및 피스톤의 파열압은 120 psi, 피스톤의 중량은 4 kg으로 적용하였으며, 공기와 물의 밀도는 상온에서의 값을 적용하였다. 시험탄 중량은 155 mm 양산탄과 유사하도록 45 kg을 적용하였다.

Table 2. Test condition parameters for numerical analyses

Parameter	Value
Projectile initial velocity(m/s)	400/500/600/700/800/900
Gas pressure(psig)	20/30/40/50
Water(kg)	5/10/15/20/25/30

저감속 회수장비에서 시험탄 발사시 가해지는 충격 하중 외에 회수과정 중에 발생하는 추가적인 하중을 최소화해야 하며 이를 위해 시험조건별 시험탄의 최대 감속도 및 출구속도에 대한 분석이 필요하다. Fig. 6은 Table 2에서 하나의 조건(45 kg projectile, 900 m/s 초기속도, 40 psi 가스압, 30 kg 물 충전량)에 대한 시험탄 속도 및 감속도 이력 결과이다. 감속도의 봉우리가 발생한 시점마다 속도의 변곡점이 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 시험탄의 초음속 이동에 따른 충격 파가 격막 또는 피스톤에 반사되어 시험탄의 전방에 영향을 미치기 때문이다.

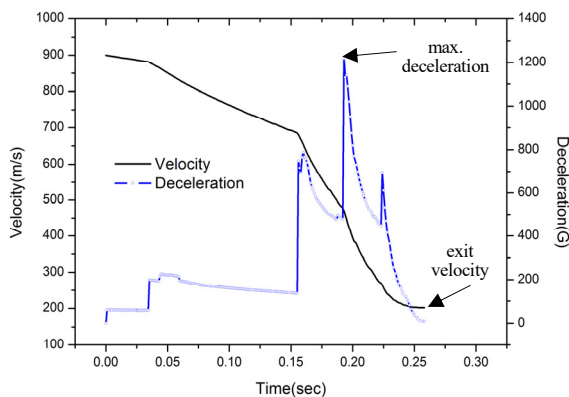


Fig. 6. Velocity and deceleration time history results of projectile

### 3.1 격자수별 수렴성 확인

본 수치해석에서는 시험탄이 이동하는 저감속 회수장비 164 m의 압력관을 유한개의 격자로 모사한다. 따라서, 격자의 개수에 따른 시험탄의 감속 특성 수렴성을 확인하기 위해 6가지 격자 개수 조건(1,000개, 5,000개, 10,000개, 30,000개, 50,000개, 100,000개)에 대해 시험탄의 속도 및 감속도 결과를 비교하였다.

수치해석 결과, 시험탄의 속도 및 감속도 결과가 Fig. 7과 같이 도출되었으며 50,000개 격자에서 충분한 수렴성을 나타내어 수치해석에 적용하였다.

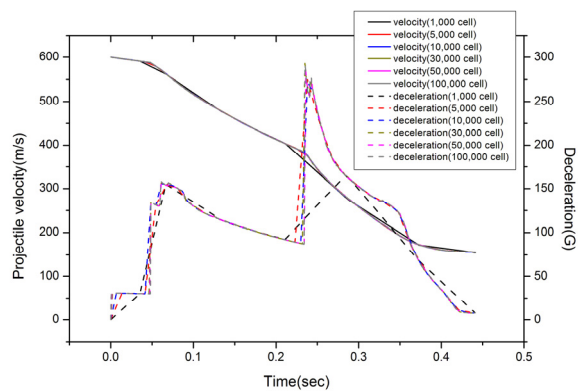


Fig. 7. Comparisons of numerical analyses results according to cell numbers

### 3.2 충전 가스압에 따른 감속 특성

저감속 회수장비 HPT(High Pressurized Tube) 구간에 충전되는 가스압에 따른 시험탄의 감속특성에 대한 수치해석을 수행하였다.

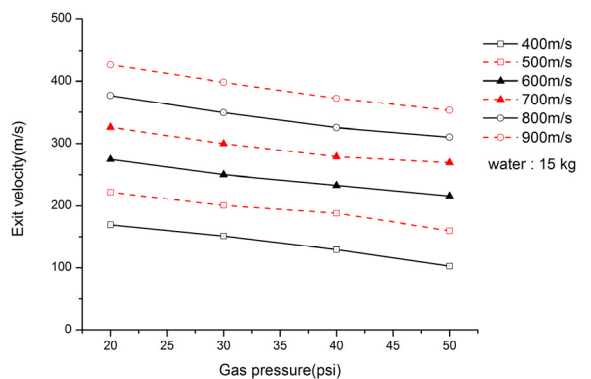


Fig. 8. Comparisons of exit velocity according to gas pressure(15 kg-water)

시험탄의 중량은 45 kg, 시험탄의 초기속도는 Table 2와 같이 400 m/s에서 900 m/s까지로 설정하였고 물 충전량은 15 kg을 적용하였다.

수치해석 결과 Fig. 8 및 Table 3과 같이 모든 시험탄의 초기 속도 조건에서 가스압이 증가할수록 시험탄의 출구속도가 감소하여, 초기속도 대비 출구속도는 26 %에서 47 %임을 확인할 수 있다.

최대 감속도의 경우 Fig. 9 및 Table 4와 같이 가스압의 증가에 따라 최대 감속도는 감소하는 것으로 나타났다. 특히 초기속도가 증가할수록 최대 감속도의 감소량이 컸다.

Table 3. Exit velocity results for gas pressure (15 kg-water)

Gas press. (psi)	Exit Velocity(m/s), Ratio(Exit Vel./Initial Vel.)		
	400 m/s	500 m/s	600 m/s
20	169.5(0.42)	222.3(0.44)	274.6(0.46)
30	151.3(0.38)	200.7(0.46)	250.2(0.42)
40	128.9(0.32)	188.2(0.38)	233.2(0.39)
50	102.6(0.26)	159.8(0.32)	216.2(0.36)
Gas press. (psi)	700 m/s	800 m/s	900 m/s
20	325.9(0.47)	376.7(0.47)	426.8(0.47)
30	299.8(0.43)	349.1(0.44)	398.2(0.44)
40	278.8(0.40)	325.3(0.41)	372.2(0.41)
50	269.2(0.38)	310.3(0.39)	352.9(0.39)

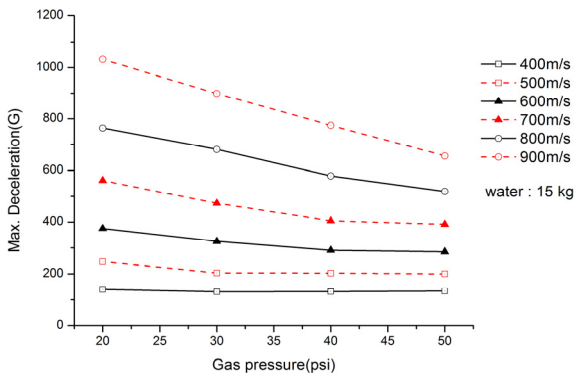


Fig. 9. Comparisons of max. deceleration according to gas pressure(15kg-water)

Table 4. Max. deceleration results for gas pressure (15 kg-water)

Gas press. (psi)	Max. Deceleration(G)		
	400 m/s	500 m/s	600 m/s
20	139.9	246.8	375.2
30	130.8	203.8	324.4
40	132.0	203.1	290.2
50	133.8	199.9	284.1
Gas press. (psi)	700 m/s	800 m/s	900 m/s
20	561.8	763.9	1032.2
30	473.3	680.4	898.9
40	405.1	578.7	774.5
50	391.5	519.6	655.5

3.3 물 충전량에 따른 감속 특성

저감속 회수장비 WFT(Water Filled Tube) 구간의 물 충전량에 따른 시험탄의 감속특성에 대해 수치해석 조건은 시험탄의 중량 45 kg, 가스압 40 psi로 설정하였다.

Fig. 10 및 Table 5에 물 충전량에 따른 출구속도를 나타내었다. 물 충전량 5 kg 조건에서는 초기속도의 약 50 % 출구속도를 나타내며, 물 충전량 30 kg 조건에서는 초기속도 대비 약 20 % 내외의 출구속도를 나타내었다.

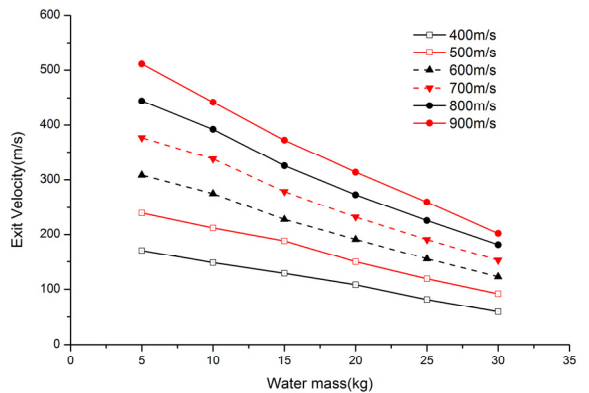


Fig. 10. Comparisons of exit velocity according to water mass(40 psi-gas pressure)

최대 감속도의 경우 Fig. 11 및 Table 6과 같이 물 충전량의 증가에 따라 최대 감속도의 크기 역시 증가하는 경향을 보이며, 이는 가스압의 증가에 따라 최대 감속도의 크기가 감소하는 결과와는 반대 경향을 나타내었다.

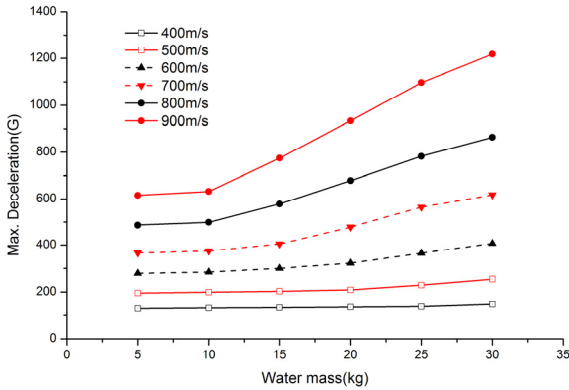


Fig. 11. Comparisons of max. deceleration according to water mass(40 psi-gas pressure)

Table 5. Exit velocity results for water mass (40 psi-gas pressure)

water mass (kg)	Exit Velocity(m/s), Ratio(Exit Vel./Initial Vel.)		
	400 m/s	500 m/s	600 m/s
5	170.1(0.43)	239.5(0.48)	308.5(0.51)
10	147.9(0.37)	211.8(0.42)	275.1(0.46)
15	128.9(0.32)	188.2(0.38)	227.9(0.38)
20	108.1(0.27)	149.7(0.30)	190.9(0.32)
25	81.7(0.20)	119.0(0.24)	155.2(0.26)
30	59.5(0.15)	91.9(0.18)	122.8(0.20)
water mass (kg)	700 m/s	800 m/s	900 m/s
5	376.8(0.54)	444.4(0.56)	511.1(0.57)
10	337.7(0.48)	392.0(0.49)	442.0(0.49)
15	278.8(0.40)	325.3(0.41)	372.2(0.41)
20	232.1(0.33)	273.0(0.34)	313.7(0.35)
25	190.5(0.27)	225.4(0.28)	259.8(0.29)
30	152.4(0.22)	181.2(0.23)	201.9(0.22)

Table 6. Deceleration results for water mass (40 psi-gas pressure)

water mass (kg)	Max. Deceleration(G)		
	400 m/s	500 m/s	600 m/s
5	127.99	195.77	278.70
10	129.90	199.25	284.16
15	131.99	203.09	300.15
20	134.24	209.03	322.39
25	136.63	230.21	365.19
30	146.54	254.95	407.35
water mass (kg)	700 m/s	800 m/s	900 m/s
5	365.95	486.76	616.06
10	374.62	498.62	632.48
15	405.06	578.66	774.49
20	478.26	678.62	933.95
25	564.65	782.45	1096.88
30	617.82	863.35	1217.71

### 3.4 시험조건에 따른 감속특성 결과 고찰

저감속 회수장비의 시험조건이 되는 HPT(High Pressurized Tube) 구간의 가스압과 WFT(Water Filled Tube) 구간의 물 충전량에 따른 시험탄의 감속특성을 확인한 결과 가스압과 물 충전량의 증가는 출구속도 감소의 원인이 된다.

가스압에 따른 수치해석에서 시험탄의 초기속도가 600 m/s, 물 충전량이 15 kg인 경우 가스압(20 psi, 50 psi)에 따른 시험탄의 속도, 감속도, 및 피스톤의 속도를 도시하면 Fig. 12와 같다. 시험탄은 0.05초 부근에서 충전된 가스압력에 따라 감속도의 차이가 발생하여 시험탄의 속도 변화 기울기에서도 차이가 발생한다. 0.2초 후의 최대 감속도는 유사하나 0.25초 이후에서 최대 감속도는 가스압 20 psi 조건에서 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 13과 같이 낮은 가스압 시험조건에서는 시험탄과 피스톤 사이의 거리 및 체적이 감소하여 이로 인해 피스톤에 2차 충격과 압력이 발생하기 때문이다. 피스톤으로부터 반사된 충격파는 다시 시험탄 전방에 압력형태로 전달되어 감속도의 봉우리를 형성하게 된다.

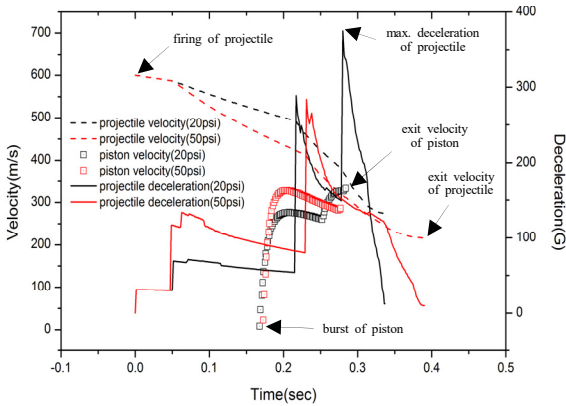


Fig. 12. Comparisons of deceleration of projectile and velocity of projectile/piston(600 m/s, 15 kg-water)

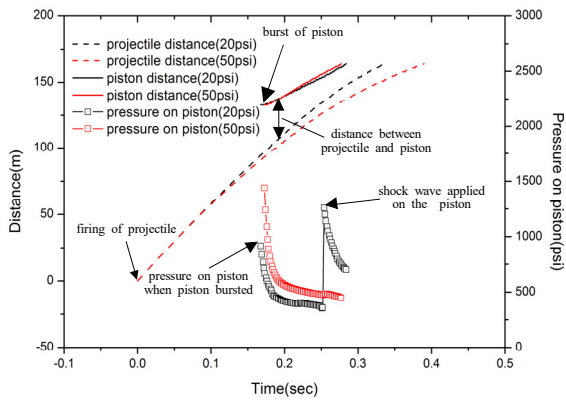


Fig. 13. Comparisons of distance of projectile/piston and pressure on piston(600 m/s, 15 kg-water)

가스압 50 psi 조건의 경우 0.3초 부근에서 감속도의 봉우리가 생성되지 않는 것은 피스톤의 빠른 이동 속도에 의해 시험탄 전방과 피스톤 사이의 체적이 가스압 20 psi 조건보다 크기 때문인 것으로 나타났다. 아울러 이로 인해 피스톤에는 파열시의 충격과 외의 충격과는 피스톤에 발생하지 않았다.

즉, 보다 높은 가스압 조건에서 발생한 충격과 압력은 파열된 피스톤의 속도를 증가시키게 되고, 증가된 피스톤의 속도는 시험탄과 피스톤 사이의 거리를 증가시키고 피스톤에 의한 반사충격과 생성을 억제하여 시험탄의 최대 감속도가 감소하게 된다.

물 충전량에 따른 수치해석에서 시험탄 초기속도 700 m/s의 경우 Fig. 14와 같이 0.2초 구간에서는 동일

한 가스압 40 psi를 적용하여 동일한 감속특성을 보이지만, 물 충전량 증가에 따라 증가된 감속도가 시험탄의 이동속도에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 물 충전량 증가는 물에 의한 마찰력( $F_{water}$ )을 증가시켜 피스톤의 이동속도를 감소시키며 이는 시험탄과 피스톤 사이의 거리를 감소시키는 원인이 된다. Fig. 15는 물 충전량 조건에 따라 시험탄과 피스톤의 거리 및 피스톤에 작용하는 압력을 나타내고 있다. 물 충전량이 증가할수록 시험탄과 피스톤의 거리가 감소하고, 이에 따라 피스톤에 작용하는 압력의 크기도 함께 증가함을 확인할 수 있다. 즉, 시험탄과 피스톤 사이의 거리 감소는 그 체적내의 유동 압력을 증가시키며 반사 충격과의 크기 역시 증가하여 시험탄에 큰 감속도를 생성하게 된다.

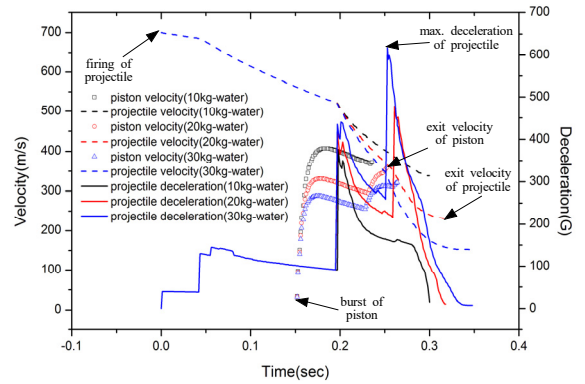


Fig. 14. Comparisons of deceleration of projectile and velocity of projectile/piston(700 m/s, 40 psi-gas)

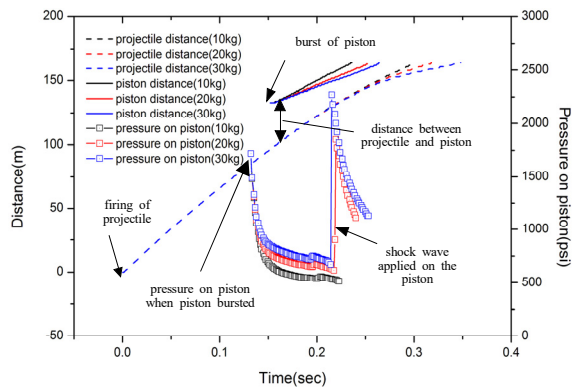


Fig. 15. Comparisons of distance of projectile/piston and pressure on piston(700 m/s, 40 psi-gas)



따라서, 가스압과 물 충전량이 증가할수록 시험탄의 출구속도는 감소하나 시험탄의 감속도는 가스압이 작을수록, 물 충전량이 클수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 피스톤의 이동속도에 의해 발생하는 것으로 시험탄과 피스톤 사이의 거리가 가까울수록 체적내의 유동압력이 커지고, 이로 인해 반사충격파의 크기 역시 커져서 시험탄에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 저감속 회수장비의 시험탄 감속 특성을 확인하기 위해 수치해석 모델을 구성하여 시험조건별 감속특성을 확인하였다.

- (1) 저감속 회수장비에서 발생하는 충격파를 묘사하기 위해 1차원 오일러 방정식과 Godunov HLL Riemann solver를 이용하여 수치해석 모델을 생성하였다.
- (2) 상기 수치해석 모델을 이용하여 저감속 회수장비 시험조건인 가스압과 물 충전량에 따른 시험탄의 감속특성(시험탄의 출구속도, 최대 감속도)을 확인하였다. 저감속 회수장비에서 가스압의 증가는 시험탄의 출구속도 및 최대 감속도를 감소시키며, 물 충전량의 증가는 출구속도를 감소시키나, 최대 감속도를 증가시키는 경향을 나타내었다. 감속도 변화량의 경우 시험탄의 초기속도가 증가할수록 변화량도 함께 증가하는 것으로 확인되었다.
- (3) 따라서, 저감속 회수장비에서 낮은 출구속도와 감속도를 얻기 위해서는 높은 가스압과 낮은 물 충전량 조건을 최적화하여 적용하는 것이 적절할 것으로 판단하였다.

상기와 같은 수치해석 결과 및 감속 특성에 대해 향후 시험을 통해 검증 및 비교를 수행할 예정이다.

#### References

- [1] D. S. Somansundaram, M. B. Trabia, B. O'TOOLE & Q.LIU, "Shock Mitigation for Electronic Boards Within a Projectile," *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas.*, Vol. 1, pp. 416-439, 2013.
- [2] Vinod Chakka, Mohamed B. Trabia, Brendan O'TOOLE, Srujanbabu Sridharala, Ladhany, Mostafiz Chowdhury, "Modeling and Reduction of Shocks on Electronic Components Within a Projectile," *Int J Impact Eng.*, Vol. 35, pp. 1326-1338, 2008.
- [3] J. A. Cordes, J. Lee, T. L. Myers, G. Hader, L. Reinhardt, C. Kessler, N. Gray, M. A. Guevara, "Statistical Comparisons Between Qualification Tests for Gun-Fired Projectiles," *J of Appl Mech*, Vol. 77, pp. 051602-1-051602-6, 2010.
- [4] A. Birk, D. Carlucci, C. McClain, N. Gray, "Soft Recovery System for 155 mm Projectiles," 23<sup>rd</sup> Int. Symposium on Ballistics, pp. 591-596, 2007.
- [5] Avi Birk, Douglass E. Kooker, "A Novel Soft Recovery System for the 155-mm Projectile and Its Numerical Simulation," ARL-TR-2642, 2001.
- [6] Frank M. White, "Fluid Mechanics," 7<sup>th</sup> Ed., 2011.
- [7] Toro. E. F., "Riemann Solvers and Numerical Method for Fluid Dynamics(3rd Ed)," Springer, 2009.
- [8] E. F. Toro, M. Spruce, W. Spears, "Restoration of the Contact Surface in the Harten-Lax-van Leer Riemann Solver," *Shock Wave*, Vol. 4, pp. 25-34, 1994.
- [9] Godunov, S. K., "A Difference Method for Numerical Calculation of Discontinuous Solutions of the Equations of Hydrodynamics," Vol. 47, No. 89, pp. 271-306, 1959.
- [10] James E. John, Theo G. Keith, "Gas Dynamics," 3<sup>rd</sup> Ed., 2006.