

## 표면 거칠기가 곡사포탄의 탄도에 미치는 영향

신건호<sup>1)</sup> · 천강민<sup>1)</sup> · 신백천<sup>1)</sup> · 고정일<sup>1)</sup> · 이준혁<sup>2)</sup> · 허장욱<sup>\*.1)</sup>

<sup>1)</sup> 금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합전공)

<sup>2)</sup> 금오공과대학교 기계시스템공학과

## The Effect of Surface Roughness on the Trajectory of Howitzer Shell

Geonho Shin<sup>1)</sup> · Kangmin Cheon<sup>1)</sup> · Baekcheon Shin<sup>1)</sup> · Jeongil Go<sup>1)</sup> · Junhyeok Lee<sup>2)</sup> · Jangwook Hur<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Mechanical Engineering(Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering),  
Kumoh National Institute of Technology, South Korea

<sup>2)</sup> Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, South Korea

(Received 3 February 2022 / Revised 21 April 2022 / Accepted 29 June 2022)

### Abstract

Surface state change of ammunition generated during the storage period increases the surface roughness and this affects the flight of ammunition, but there are no research results quantitatively indicating this. In this study, the drag force for each Mach number of howitzer shells was calculated through CFD to which the surface data of the howitzer shell was applied, and analysis of trajectory was performed using drag force values as an input of the 4th Runge-Kutta method, and the degree of decrease of the maximum range caused by the surface roughness of the howitzer shell was estimated. As a result, it was confirmed that the maximum range of howitzer shell with high surface roughness was 1.12 % shorter than that of howitzer shell without roughness. It was confirmed that the effect of surface roughness on the trajectory is not negligible.

Key Words : CFD(전산유체역학), Drag Force(항력), Maximum Range(최대사거리), Runge-Kutta Method(Runge-Kutta 법), Sand-Grain Roughness(Sand-Grain 거칠기)

### 기 호 설 명

$\delta$  : Sand-grain 알갱이 지름

$F_D$  : 항력

$g$  : 중력 가속도

$h$  : 구간간격

$L$  : 탄 길이

$m$  : 탄 질량

$R$  : 원 반지름

$R_{zd}$  : 전체 평균 peak-to-valley 높이

$t$  : 탄이 포구를 떠난 이후 경과된 시간

\* Corresponding author, E-mail: hhjw88@kumoh.ac.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

- $v$  : 탄 속도
- $x$  : 탄 수평 비행좌표
- $y$  : 탄 수직 비행좌표
- $x_{si}, y_{si}$  : 탄 표면 좌표
- $x_{sc}, y_{sc}$  : 원 중심좌표
- $z$  : 표면 거칠기
- $Z_i$  : 구간 평균 peak-to-valley 높이

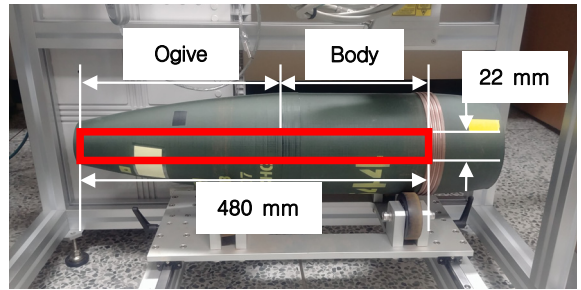


Fig. 1. Measured area

## 1. 서론

탄은 적의 인원이나 물자, 사회 간접자본들을 파괴시키기 위한 무기체계의 한 요소로 모든 무기체계의 궁극적 목표수단이다. 특히, 곡사포탄은 전시에 보병의 후방 지원화력으로 중요한 역할을 수행하며, 체계 특성상 높은 최대사거리를 요구한다<sup>[1]</sup>.

탄은 생산 후 저장기간에 따라 화학성분이 변질되기 때문에 성능과 안전성이 저하되는 특성을 가지고 있으며, 특히 탄 표면의 경우 장기저장 시 페인트 도막 손상, 발청 등의 현상이 발생한다<sup>[2,3]</sup>. 이러한 현상은 탄의 표면 거칠기를 악화시키며, 거친 표면은 탄의 비행을 저해하는 요소가 되나, 탄의 표면 거칠기가 탄의 비행을 저해하는 정도를 나타내는 정량적인 연구 결과는 탐색이 곤란할 정도로 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 곡사포탄의 표면 데이터를 적용한 유동해석을 통해 곡사포탄의 마하수별 항력을 산출하고, 이를 4차 Runge-Kutta 법의 입력값으로 하여 탄도해석을 수행하였으며, 곡사포탄의 표면 거칠기에 의해 발생하는 탄 속력과 최대사거리에 미치는 영향을 정량적으로 도출하였다.

## 2. 표면 거칠기 산출 기법

### 2.1 표면 데이터 측정

본 연구에서의 곡사포탄은 표면의 발청정도에 따라 A, B, C급으로 분류되었으며, A급 곡사포탄의 경우, 발청이 거의 일어나지 않아 표면이 매끄러운 것으로 가정하였다. 표면 데이터는 레이저 센서를 이용하여 획득하였으며, 레이저 센서는 볼스크류와 모터로 구성된 수평이동장치에 장착되어 곡사포탄의 축방향으로 병진운동하며 데이터를 획득하였다.

측정 장비의 한계로 인해 데이터는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 Ogive와 Body의 길이(480mm)와 폭(22mm) 내 표면에서만 수집하였다.

곡사포탄의 표면이 곡면이기 때문에 레이저 센서에서 수집된 데이터를 그대로 사용할 수 없어, 데이터 전처리를 진행하였다. 먼저, Python의 scipy모듈에서 최소제곱오차를 계산하는 최적화 코드를 이용하여 동일한 축방향 위치에서 원주방향으로 수집된 데이터들이 그리는 추세선과 가장 유사한 원호를 갖는 원이 생성되게 코드를 구성하였다. 이후, 생성된 원으로 표면 거칠기를 도출하였으며, 사용된 식은 다음과 같다<sup>[4]</sup>.

$$z_i = \sqrt{(x_{sc} - x_{si})^2 + (y_{sc} - y_{si})^2} - R \quad (1)$$

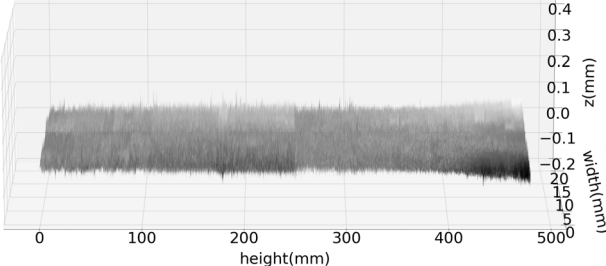
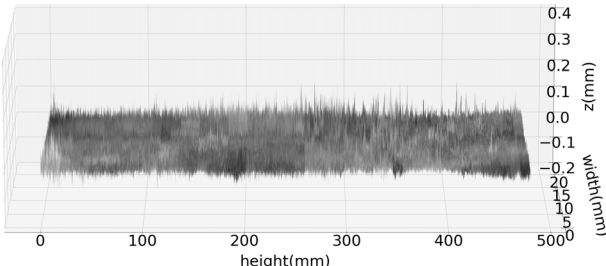
식 (1)을 통해 산출된  $z$ 와  $z$ 의 모수들은 Table 1에 나타내었다. C급 곡사포탄의 거칠기가 B급의 것보다 더 큰 편차를 갖는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 Sand-grain 거칠기

수집된 표면 거칠기를 유동해석에 바로 적용할 수 없기 때문에 본 연구에서의 유동해석은 곡사포탄의 표면 거칠기를 등가의 Sand-grain 거칠기로 적용하였다. Sand-grain 거칠기는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 표면에 지름  $\delta$ 의 구형 알갱이가 있을 때를 가정하여, 일부 변수들을 변경하는 식을 통해 표면 거칠기를 해석에 반영할 수 있다<sup>[5]</sup>.

실제 표면 데이터로부터 Sand-grain 거칠기의  $\delta$ 를 산출하는 기법에는 평균, 실효값, peak-to-valley 등이 있다. 여기서 peak-to-valley는 식 (2)와 Fig. 3에 나타난 바와 같이 측정표면을 측정방향으로 5등분하고 각 부분의 최고높이와 최저높이의 차를 계산하는 기법으로 T. Adams<sup>[6]</sup> 등은 peak-to-valley 높이<sup>[7]</sup>가 적용된 과이

Table 1. Surface roughness comparison

Grade	Surface roughness	Parameter(mm)	
A	Assumed to be smooth surface		
B		Average absolute deviation	0.01068
		Max	0.15177
		Min	-0.11529
		Standard deviation	0.01380
C		Average absolute deviation	0.01206
		Max	0.36831
		Min	-0.18863
		Standard deviation	0.01619

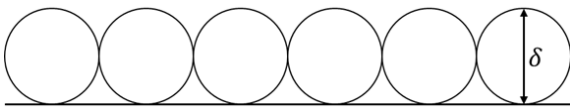


Fig. 2. Sand-grain roughness configuration

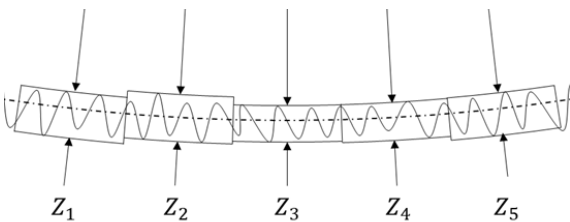


Fig. 3. Peak-to-valley height

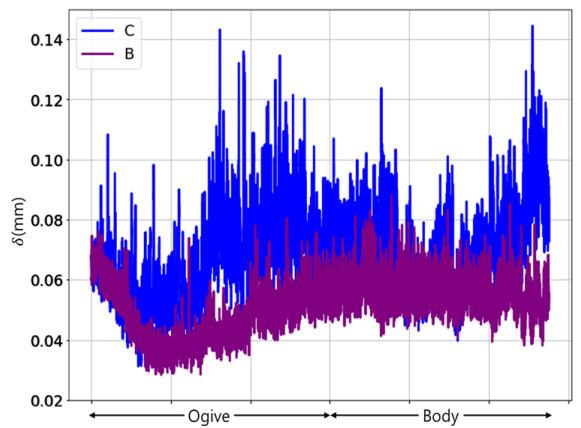


Fig. 4. Equivalent Sand-grain roughness

프 난류 유동 해석을 통해 식 (3)을 적용한 유동해석 결과가 실험 결과와 가장 유사하다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 포탄의 표면에서 같은 원주 방향으로 측정된 표면 거칠기 데이터셋들 각각에 식 (3)을 적용하여  $\delta$ 를 도출하였으며, 도출된  $\delta$ 값의 분포를 Fig. 4에 나타내었다.

$$R_{zd} = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \quad (2)$$

$$\delta = 0.978R_{zd} \quad (3)$$

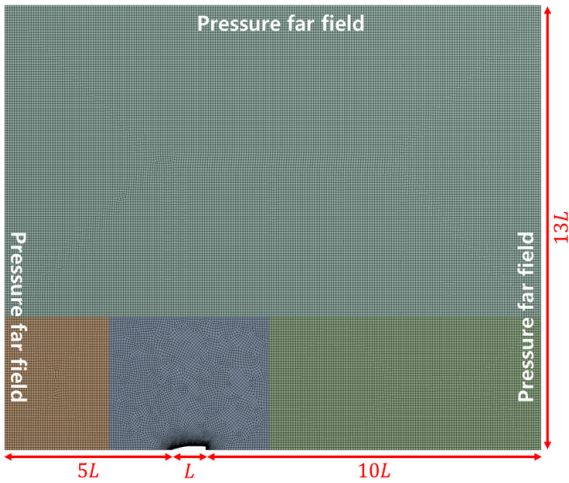


Fig. 5. Analysis model of ammunition

### 3. 유동해석

#### 3.1 해석방법

유동해석은 상용코드인 Fluent 19.2로 진행되었다. Fig. 5에 나타낸 것과 같이 3면에 pressure-far-field를 갖는 축대칭의 2D해석으로 진행하였으며, 탄의 회전은 고려하지 않았다<sup>[8]</sup>. 등가 Sand-grain 거칠기는 Ogive와 Body의 표면을 각각 32 등분하고, 각 부분의  $\delta$  평균값들을 계산하여 분할된 표면들에 반영하였으며, 이는 Fig. 6에 나타내었다.

계산영역은 곡사포탄의 진행 방향으로 5 L, 반대방향으로 10 L, 원주 방향으로 13 L의 크기로 생성하였

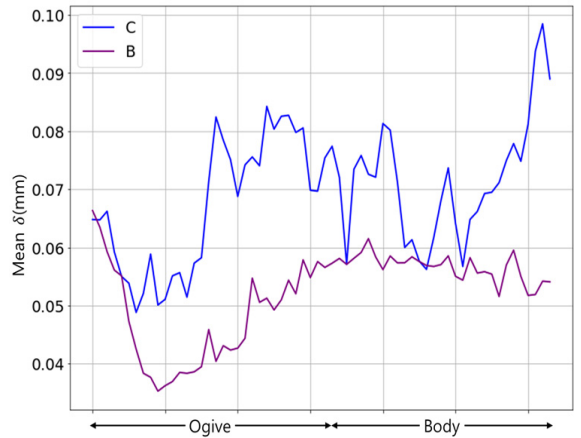


Fig. 6. Mean equivalent Sand-grain roughness

으며, 난류모델은 155 mm M107 포탄을 대상으로 한 유동해석<sup>[9]</sup>에서 SA(Spalart-Allmaras) 모델보다 실험결과에 더 유사한 해석결과를 도출한  $k-\omega$  SST 모델을 적용하였다. 또한, 일반적으로  $k-\omega$  SST 모델을 적용한 유동해석모델은  $y^+$  값을 1이하로 유지하는 것이 적절하기 때문에 표면과 인접한 지역의 격자 조밀도를 높여가며 반복적으로 해석을 진행하는 것으로 격자 의존성 분석을 수행하였다. 표면 거칠기를 적용하지 않은 해석모델의  $y^+$  값이 곡사포탄의 모든 표면에서 1보다 작은 격자 형상을 최종적으로 도출하였으며, 이는 Fig. 5에 나타내었다<sup>[9-12]</sup>.

해석은 표면 거칠기별로 마하 0.4에서 1.7까지 0.1의 단위로 총 42개의 케이스를 생성하여 진행하였으며, Fluent 19.2의 기본값인 26.85 °C의 대기온도가 적용되었다. 고도에 따른 공기의 물성치 변화는 없는 것으로 가정하고 항력에 많은 영향을 주는 점성계수의 경우 Sutherland 법칙을 통해 가변적으로 변화하도록 설정하였으며, 모든 케이스에서 곡사포탄의 축방향으로 걸리는 항력을 산출하였다.

#### 3.2 해석결과

해석결과로 도출된 마하수에 따른 항력과 항력계수는 Fig. 7-8 및 Table 2에 나타내었으며, 마하수가 낮을 때에는 발청에 의한 표면 거칠기의 영향이 미미하였으나, 마하수가 1.2 이상이 되면 마하수가 증가할수록 항력의 차이가 점점 커지는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 표면 거칠기가 적용된 곡사포탄들의 항력을 서로 비교하면 표면의 거칠 정도에 의한 차이가 크지

않으나, 거칠기가 적용되지 않은 곡사포탄의 항력과는 상대적으로 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 곡사포탄과 같은 초음속 비행체를 대상으로는 표면 거칠기도 무시할 수 없다는 것을 나타낸다.

Table 2. Drag coefficient depending on mach number

Mach number	Drag coefficient		
	A	B	C
0.4	0.341517	0.347443	0.349418
0.5	0.348168	0.355121	0.357247
0.6	0.345827	0.353328	0.355343
0.7	0.343269	0.350993	0.352914
0.8	0.347319	0.355040	0.356847
0.9	0.377318	0.384296	0.385830
1.0	0.520773	0.527466	0.528838
1.1	0.566379	0.572908	0.574256
1.2	0.557290	0.563555	0.564831
1.3	0.537217	0.543163	0.544391
1.4	0.517179	0.522932	0.524086
1.5	0.496557	0.502147	0.503222
1.6	0.476816	0.482225	0.483233
1.7	0.457136	0.462477	0.463446

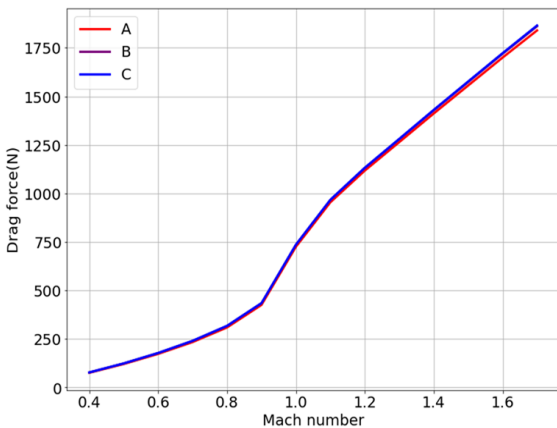


Fig. 7. Drag force depending on mach number (0.4–1.7)

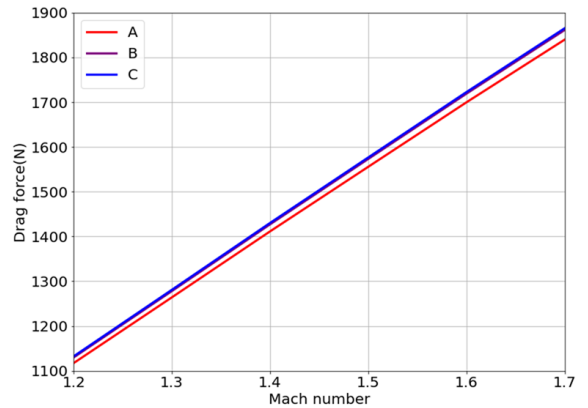


Fig. 8. Drag force depending on mach number (1.2–1.7)

#### 4. 탄도해석

##### 4.1 해석방법

곡사포탄의 회전축이 항상 탄도와 평행하다고 가정할 때 항력에 의한 탄도와 탄 속력은 식 (4)-(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \left[ x \quad \frac{\partial x}{\partial t} \quad y \quad \frac{\partial y}{\partial t} \right] \quad (4)$$

$$f(t, \mathbf{y}) = \frac{\partial \mathbf{y}}{\partial t} = \left[ \frac{\partial x}{\partial t} \quad \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad \frac{\partial y}{\partial t} \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \right] \quad (5)$$

$$v = \sqrt{\left( \frac{\partial x}{\partial t} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{F_D}{mv} \times \frac{\partial x}{\partial t} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{F_D}{mv} \times \frac{\partial y}{\partial t} - g \quad (8)$$

여기서,  $F_D$ 는 유동해석 결과로 산출된 값을  $v$ 값에 따라 선형보간하여 적용하였다.

탄도해석은 일반적으로 가장 많이 사용되는 4차의 Runge-Kutta 법을 MATLAB으로 작성하여 수행하였다. Runge-Kutta 법은 고차 도함수를 계산하지 않으면서도

높은 Taylor 급수의 정확도를 얻을 수 있는 기법으로 위의 식들을 4차 Runge-Kutta 법에 적용한 결과는 식 (9)-(13)과 같다<sup>[13]</sup>.

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)h \quad (9)$$

$$k_1 = f(t_i, y_i) \quad (10)$$

$$k_2 = f(t_i + 0.5h, y_i + 0.5k_1h) \quad (11)$$

$$k_3 = f(t_i + 0.5h, y_i + 0.5k_2h) \quad (12)$$

$$k_4 = f(t_i + h, y_i + k_3h) \quad (13)$$

탄도해석을 위한 초기값은 Table 3과 같으며, 곡사포탄의 중량은 93.5 lb(42.41 kg), 포구속도는 563 m/s로 설정하였다<sup>[8,14]</sup>.

#### 4.2 해석결과

탄도해석 결과를 Table 4와 Fig. 9-10에 나타내었으며, 곡사포탄의 표면이 거칠수록 최대사거리가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 Table 5 및 Fig. 11-12에 나타난 곡사포탄의 전반적인 속도 감소로 인해 나

Table 3. Initial values

Property	Value
Gravity acceleration ( $g$ )	9.81 m/s <sup>2</sup>
Mass of ammunition ( $m$ )	93.5 lb
Initial velocity	563 m/s
Gun elevation angle	45°
Interval step ( $h$ )	0.05

Table 4. Maximum range

Grade	Max. range(m)	Comparison with A(%)
A	9,831.9	-
B	9,742.8	0.91
C	9,721.8	1.12

탄 것으로 확인할 수 있으며, 특히 C급 곡사포탄의 경우 최대사거리가 1.12 %까지 감소하는 것으로 알 수 있다. 이러한 결과로부터 곡사포탄의 발청상태는 사거리에 직접적으로 영향을 미치고 있고, 곡사포탄의 발청이 C급 이상으로 심각한 경우의 사거리 감소는 더욱 크게 될 수 있으므로 탄의 저장 및 관리의 중요성을 인식할 수 있다.

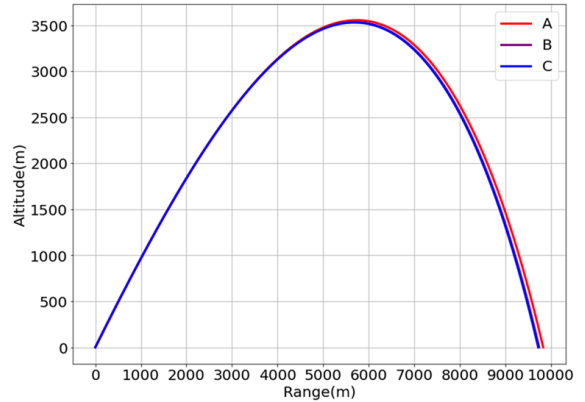


Fig. 9. Estimated trajectory(range 0~10,000 m)

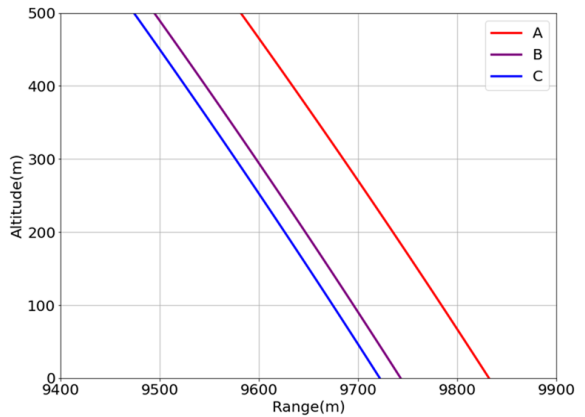


Fig. 10. Estimated trajectory(range 9,400~9,900 m)

Table 5. Minimum velocity

Grade	Min. velocity(m/s)	Comparison with A(%)
A	170.59	-
B	169.37	0.72
C	169.06	0.90



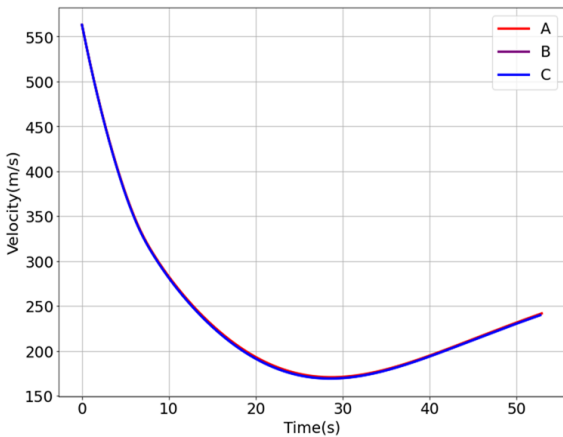


Fig. 11. Velocity configuration according to flight time (0~55 s)

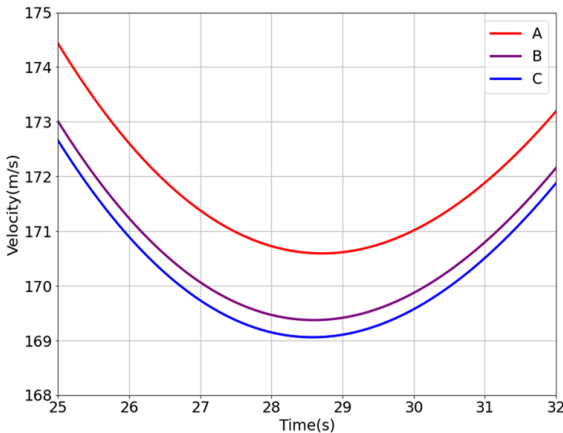


Fig. 12. Velocity configuration according to flight time (25~32 s)

## 5. 결론

본 논문에서는 표면 거칠기가 탄도에 미치는 영향을 분석하였다. 레이저 센서로부터 얻어진 곡사포탄의 상태별 표면 데이터는 등가의 Sand-grain 거칠기로 변환되어, 유동해석에 적용되었다. 이후, 유동해석으로 곡사포탄의 조건별 항력을 도출하였으며, 도출된 항력을 4차 Runge-Kutta 방정식에 적용하여 탄도를 추정하였다. 그 결과, 표면 거칠기가 심할수록 항력이 증가하였고, 곡사포탄의 속도가 더 빠르게 감소되었으며, 사거리도 감소되었다. 특히, 표면이 매우 거친 C급 곡

사포탄의 경우 사거리가 1.12 %까지 감소되는 것을 확인하였으며, 이는 비행시간 전반에 걸쳐 탄의 속력이 감소한 결과로 확인된다.

본 연구는 탄의 회전을 고려하지 않았으며, 실제 곡사포탄의 형상에서 회전탄대를 미반영하는 등 단순화를 진행하여 일부 차이가 있으나, 실제 탄의 형상을 그대로 적용하거나, 탄의 회전에 의한 마그누스 효과, 고도에 따른 대기조건 변화 등을 함께 고려하여 결과를 도출하는 것도 의미가 있을 것이다. 또한, 본 연구에서는 진행하지 못했지만 실험적 검증도 해볼 것을 권장한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성(Grand ICT연구센터) 사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2022-2020-0-01612).

## References

- [1] J. T. Hong and S. K. Choi, "Development Direction of Firepower Weapon Systems," Defense Technology, Vol. 321, pp. 36-55, 2005.
- [2] J. W. Lee, "Understand 'Ammunition Stockpile Reliability Program(ASRP)' Correctly," Defense Technology, Vol. 376, pp. 102-107, 2010.
- [3] B. Ryoo, et. al., "Storage Humidity Management Method of Missiles," 2016 KSPE Fall Conference, pp. 687-690, 2016.
- [4] Department of Mechanical Convergence Industry Standards, "Geometrical Product Specifications(GPS) - Surface Texture: Profile Method - Terms, Definitions and Surface Texture Parameters," Korean Agency for Technology and Standards, KS B ISO4287, South Korea, 2003.
- [5] D. V. Brezgin, et. al., "The Surface Roughness Effect on the Performance of Supersonic Ejectors," Thermophysics and Aeromechanics, Vol. 24, No. 4, pp. 569-578, 2017.
- [6] T. Adams, C. Grant and H. Watson, "A Simple Algorithm to Relate Measured Surface Roughness to

- Equivalent Sand-grain Roughness,” International Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics, Vol. 1, No. 1, pp. 66-71, 2012.
- [7] F. F. Farshad and T. C. Pesacreta, “Coated Pipe Interior Surface Roughness as Measured by Three Scanning Probe Instruments,” Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 50, No. 1, pp. 6-16, 2003.
- [8] K. Kim, et. al., “Influence of Projectile Surface Defects on the Trajectory,” 2011 KSPE Fall Conference, pp. 279-282, 2011.
- [9] A. Ko, et. al., “Prediction and Analysis of the Aerodynamic Characteristics of a Spinning Projectile Based on Computational Fluid Dynamics,” International Journal of Aerospace Engineering, Vol. 2020, Article ID 6043721, 2020.
- [10] J. DeSpirito and K. R. Heavey, “CFD Computation of Magnus Moment and Roll Damping Moment of a Spinning Projectile,” AIAA 2004-4713, AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit, 2004.
- [11] W. M. Elnaggar and C. Zhi-hua, “Aerodynamic Characteristics of Unguided Artillery Projectile,” Advanced Materials Research, Vol. 1014, pp. 165-168, 2014.
- [12] I. K. Suastika, et. al., “Characteristics of Drag due to Streamwise Inhomogeneous Roughness,” Ocean Engineering, Vol. 223, 108632, 2021.
- [13] S. C. Chapra and R. P. Canale, “Numerical Methods for Engineers,” McGraw Hill, USA, pp. 586-593, 2016.
- [14] Headquarters, “Army Ammunition Data Sheets for Artillery Ammunition: Guns, Howitzers, Mortars, Recoilless Rifles, Grenade Launchers, and Artillery Fuzes,” Department of the Army, USA, 1994.