

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.3.683>

JCCT 2023-5-79

## 개선된 브레즈넘 알고리즘을 이용한 탄흔 시뮬레이션

### Ballistic Cavity Simulation using Modified Bresenham Algorithm

석윤지\*, 진성아\*\*

Yunji Seok\*, Seongah Chin\*\*

**요약** 게임이나 가상현실에서 차세대 무기를 사용한 콘텐츠가 지속적으로 등장하고 있다. 스토리 전개 상황에서, 소총과 탄환의 고유한 특성에 따라 목표물의 탄흔의 흔적이 다르게 관찰된다. 또한 범죄 과학수사 중 Forensic ballistics을 활용하여 범죄 흔적을 수사하는 일에도 존재한다. 이 과정 속에서 Ballistic Coefficient와 탄도에 의한 cavity 사이의 관계를 파악하는 일은 매우 중요하다. 본문에서는 modified Bresenham's line algorithm을 이용하여 게임이나 가상현실에서 현실감을 높여줄 수 있는 물리기반 공동 시뮬레이션을 제안하였다.

**주요어** : 볼리스틱 계수, 브레즈넘 알고리즘, 공동, 포렌식 볼리스틱

**Abstract** Content featuring next-generation weapons is continuously appearing in games and virtual reality. In the context of story development, the traces of a target's bullet marks are observed differently according to the unique characteristics of the rifle and bullet. Additionally, there is an example of using forensic ballistics to investigate crime by examining the traces of bullets. Understanding the relationship between the ballistic coefficient and cavity by ballistics is crucial during this process. This paper proposes a physics-based cavity simulation using the modified Bresenham's line algorithm, which can enhance realism in games and virtual reality. This simulation accurately models the trajectory of bullets and cavity formation upon impact, creating a more realistic representation of how bullets interact with materials. Overall, physics-based simulations can greatly enhance the realism and immersion of games and virtual reality experiences and can have applications in forensic investigations.

**Key words** : Ballistic Coefficient, Bresenham's algorithm, Cavity, Forensic ballistics

#### 1. 서론

근래, 차세대 무기가 계속해서 등장하지만 여전히 보병전의 중요성은 강조되고 있다. 따라서 소총 및 중화기총의 진화는 계속되고 있다. 총의 진화는 곧 탄환의

진화에 직결되는데, 대표적인 사례로 과거 80-90년대에 소비에트 연방의 구형 AK-47 소총이 있다. 사용되던 7.62 \* 39mm 탄을 5.45 \* 39mm 탄으로 채용하면서, AK-47의 개량 버전인 AK-74가 등장하곤 하였다. 최근에는, 독일의 주력 제식 소총으로 채용하던 G36을 HK433으로 대체하려는 움직임이 보였다(그림 1). 기본

\*준회원, 성결대학교 미디어소프트웨어학과 연구원 (제1저자) Received: March 30, 2023 / Revised: April 14, 2023

\*\*정회원, 성결대학교 미디어소프트웨어학과 정교수 (교신저자) Accepted: May 8, 2023

접수일: 2023년 3월 30일, 수정완료일: 2023년 4월 14일

\*\*Corresponding Author: solideo@sungkyul.ac.kr

게재확정일: 2023년 5월 8일

Dept. of Media Software, Sungkyul Univ, Korea

적으로 5.56 \* 45mm Nato 탄을 사용하지만, 300 BLK, 7.62 \* 39 mm, 7.62 \* 51 mm까지 혼용 사용이 가능함을 밝혔다 [1]. 또한, 이스라엘군은 2009년에 TAR-21을 개량한 단축형 모델인 X95 (MTAR-21)를 2013년부터 지급하기 시작하여 2018년까지 현재 사용 중인 M16, M4 계열의 소총들을 대체할 예정이다. 5.56 \* 45mm Nato을 바탕으로 5.45 \* 39mm, 300 BLK, 9mm 등을 혼용하여 사용할 수 있다 [2]. 이러한 소총들은 출품 및 군납 직전에 지속적인 시뮬레이션을 거쳐야 하는데, 일반적으로 사격에 대한 정확력, 관통력, 저지력을 확인하기 위해서이다. 더불어, 부분적으로 수명이 다한 소총은 해당 부품만 교체하여 다시 사용하기 마련이며, 이상 유무 확인을 위해 사용직전, 시뮬레이션 단계를 거치는 것이 일반적이다. 소총의 시뮬레이션 중에서도 경제성 측면을 고려하면, 탄환의 소비가 만만치 않다. 분명, 이를 타파하기 위한 가상 시뮬레이션의 필요성은 충분히 고려될 가치가 있다.

영구 공동을 유발하는 충돌 메커니즘과 임시 공동을 유발하는 충돌 메커니즘을 토대로한 상처 탄도학 (Wound ballistics)을 중심으로 형성된 법의학적 탄도학 (Forensic ballistics)은 법의학적 목적으로 탄도학을 적용한 것이다 [3]. 1915년에 농장 노동자 찰리 스틸로우 (Charlie Stielow)가 농장주와 가정부를 살해한 혐의로 기소된 사건이 있었다. 비과학적 총기 수사로 진행된 이 사건으로, 미국 최초의 독립 범죄 과학 연구소 '법의 탄도학 센터(Bureau of Forensic Ballistics)'가 등장하게 되었다. 총기, 지문, 혈액 등 미세한 증거물 분석으로 과학수사의 큰 틀을 마련되었다 [4]. 그러나, 총기 사고 현장의 보존은 언제나 확실치 않으며, 훼손의 여부까지 더해진다면 수사의 방향은 더욱 넓어지고 복잡해지기 마련이다. 법의학적 시뮬레이션에서 여러 가정을 바탕으로 직접 전개해가는 행위는 정확에 근접한 결론을 내릴 수 있겠으나, 탄의 발사와 탄착까지 수많은 변수가 있다는 점을 고려하면, 시간적 차원에서 비효율적일 수밖에 없다. 따라서 사건 해결을 위한 가상 시뮬레이션의 존재는 시간의 효율성 측면에서 필수적일 수밖에 없다.

본 논문에서는 선행 발표된 학술대회[5]의 확장판으로 Modified Bresenham's Line Algorithm 을 이용하여 탄환의 Ballistic Coefficient를 기반으로, 총알의 파괴력과 연관된 공동의 형상을 확인하는 시뮬레이션에 대한



연구를 제시하였다. 탄환 공동의 볼륨의 크기를 정리로 제시하고 증명하였으며, 3D 형태의 공동을 재현하였다.

그림 1. HK433(왼쪽)과 IWI X95(오른쪽)  
Figure 1. HK433 (left) and IWI X95 (right)

## II. 물리적 특징과 알고리즘

### 1. 탄도계수(Ballistic Coefficient)

일반적으로 탄이 목표물을 고속으로 충돌하는 경우, 관통현상은 표적과 그의 고유 성질에 따라 달라지고, 탄자가 표적을 타격하는 각도에 크게 달라진다. 표적을 구성하는 재료의 경도, 강도, 연성, 취성 및 소성변형들의 기계적 성질과 밀도, 응용점 등의 물리적 성질이 있는 반면에, 탄자에는 탄자의 속도와 그의 형상 및 재료의 특성 등이 있다. 그만큼 탄의 관통현상은 추적 및 정확한 해석이 어렵게 보인다 [6]. 따라서, 본 논문에서는 탄환의 성질을 대표하는 탄도계수를 중심으로 시뮬레이션 방법을 연구하였다.

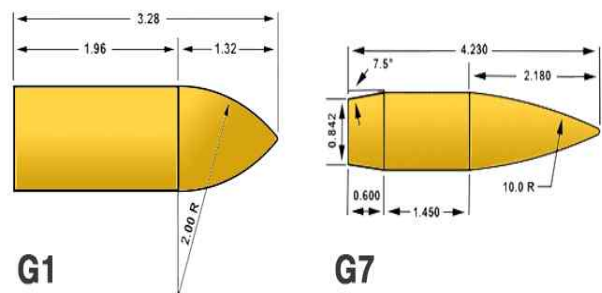


그림 2. 탄환 모델 G1과 G7  
Figure 2. G1 and G7 Bullet Model

탄도계수는 특정 탄환의 항력에 대한 상대적 저항력을 보여주는 값으로, 모델에 따라 탄도계수 유형이 달라지며, 탄도계수 수치를 측정하여 탄환에 얼마나 적합한지를 알 수 있게 된다. 탄환에는 주요 모델 9가지가 있는데, 그 중 그림 2에 있는 G1과 G7모델 두 가지가 일반적으로 사용된다. 탄의 물리적인 속성을 반영하는 탄도계수는  $BC = M/(D^2I)$ 과 같이 정의 된다 [7]. M은 grain단위를 사용한 총알의 질량, D는 총알의 구경 그

리고, I는 총알 고유 형상인 형상 계수(Form Factor)를 각각 나타낸다. 이러한 탄도계수는 탄이 발사되는 시점부터 종착까지 소유하게 될 운동에너지의 손실률에 큰 영향을 준다. 또한 충분한 운동에너지를 갖고 그에 따라 속도 역시 충분하다면 총알은 피사체를 그대로 관통하고, 그렇지 못한 운동에너지는 충분치 못한 속도를 갖게 되고, 전자에 비교적 후퇴하는 관통력을 갖는다. 이러한 총의 운동은 상대적으로 큰 임시 공동을 만들어 내고, 이 임시 공동은 시간이 지남에 따라 영구 공동으로 자리하게 된다. 아래의 그림 3은 젤라틴에 총을 발사한 실험으로 임시 공동과 영구 공동을 시각적으로 확인할 수 있다 [8].



그림 3. 젤라틴을 사용한 영구 공동과 임시 공동 실험  
 Figure 3. Permanent Cavity and Temporary Cavity Experiment with Gelatin

## 2. 브레스넘 라인알고리즘 개선(Modification of Bresenham's line algorithm)

래스터 변환은 물체를 표현하고자 할 때 사용되는 점, 선 그리고 면들을 화소공간으로 사상시킬 때, 어느 위치의 화소값을 선택해야 하는지를 결정하는 알고리즘이다 [9]. 브레스넘 알고리즘(Bresenham's line algorithm)은 정수의 덧셈, 뺄셈 및 비트 이동만을 연산으로 사용하여 표준 컴퓨터 구조적 면에서는 매우 효율적인 알고리즘이다.

본 연구에서는 표적 내부에 공동을 표현하기 위해서 30\*30\*30의 복셀을 표적으로 가정하여 실험하였다. BC에 따라 생기는 최대 높이의 복셀과 공동이 시작되는 복셀을 바탕으로 기울기를 계산하여 브레스넘 알고리즘을 통해 각 프레임의 최대높이 복셀을 배열에 저장한다. 총알이 지나가는 해당 프레임의 최대 너비의 복셀과 최대 높이의 복셀 사이 기울기를 바탕으로 다시

한번 브레스넘 알고리즘을 활용하여 내부 해당 프레임의 공동 복셀들을 채색하여 그림 4와 같이 구현한다.

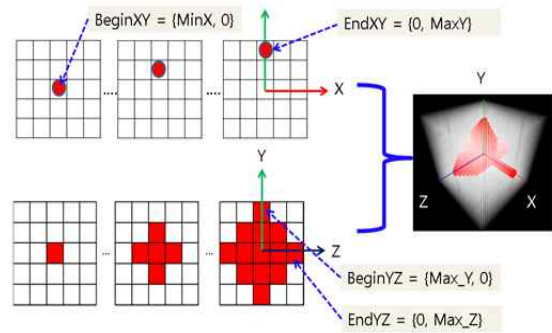


그림 4. 시작, 중간, 맥스 사이즈에서 복셀 시뮬레이션  
 Figure 4. Voxels of each frame in Simulation with the start, middle, max size frames and the simulated voxels

표 1. 알고리즘 1: MBA (Modified Bresenham Algorithm) Table 1. Algorithm 1: MBA (Modified Bresenham Algorithm)
<b>Algorithm 1: MBA(BeginV1, BeginV2, EndV1, EndV2, array)</b>
Input1: BeginV1 : Input2: BeginV2 : Input3: EndV1 : Input4: EndV2: Input5: array:
1 Begin 2 du = EndV1 - BeginV1; 3 dv = EndV2 - BeginV2 4 D = 2dv - du 5 increEast = 2dv 6 increNEast = 2dv-2du 7 u=BeginV1; v = BeginV2 8 SaveVoxel(voxel, u, v) 9 while(u < endV1) 10 if (D <= 0) 11 D += increEast, u++ 12 else 13 D += increNEast, u++, v++ 14 SaveVoxel(array, u, v) 15 End

MBA(Modified Bresenham Algorithm), 표 1의 Algorithm 1과 표 2의 Algorithm 2는 표적 내부의 공동을 표현하기 위해 voxel 시뮬레이션을 생성하는 과정을 기술하고 있다. 또한, 표 3의 정리 1에서는 수학적 귀납법으로 알고리즘의 정확성을 보여주었다. n =

k일 때  $S_n = k$ 가 참이 됨을 증명한다. MBA의 정의에 따라,  $n = k$ 일 때, MBA는 이전에 선택된 voxel에  $4(k-1)$ 을 추가한다. 따라서, 우리는  $S_n = k$ 가 참이 됨을 확인할 수 있다.

표 2. 알고리즘 2: Cavity() Table 2. Algorithm 2: Cavity()
<b>Algorithm2: Cavity()</b> Output: Cavity:
1 Begin
2 DefHeightVoxel()
3 MBA(BeginX, 0, maxHeightX,
4       maxHeightY, heightVoxel) //Calculate
heightVoxels
5 MakeCavity()
6 for (voxel in heightVoxel)
7 if (bullet.x >= voxel.x)
8       MBA(voxel.y, 0, 0, voxel.z, widthVoxel)
//Calculate the position of voxel at X
9 DrawCavity()
10 End

표 3. 정리 1: 탄환의 크기 Table 3. Theorem 1: the size of wound
<b>Theorem 1: The size of wound</b> Proof)
Base case, $n = 1$ , then we obviously show $= 1$
We assume that if $n = k-1$ then the become true.
$n = 2$ , $= 1 + 4 = 1 + 4(2 - 1)$
$n = 3$ , $= 1 + 4 + (4+4) = 1 + 4(2-1) + 4(3-1)$
$n = 4$ , $= 1 + 4 + (4+4) + (4+4+4) = 1 + 4(2-1) + 4(3-1) + 4(4-1).....$
We should show if $n = k$ then is satisfactory as well.
By the assumption 2), holds the property as above.

### III. 실험 및 결과

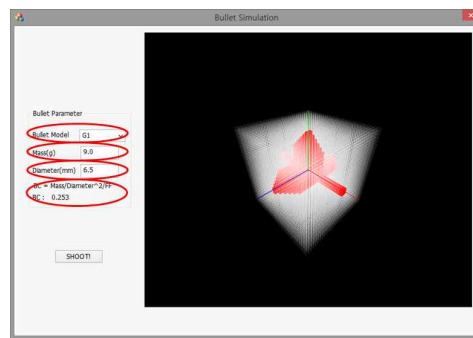
#### 1. 시뮬레이션 구현환경

본 연구에서는 위 내용을 바탕으로 탄도계수를 기반으로 한 가상 공동 시뮬레이션 프로그램을 제작하기 위해 MFC에서 OPEN GL을 이용하였다(그림 5(a)). 사용자가 Bullet Model을 선택하고, 질량과 직경을 입력한 후, 'SHOOT!' 버튼을 누르게 되면 탄도계수를 계산하여 보여주며, 총알의 궤적과 총알이 지나가며 생기는 임시공동을 보여주게 된다. 이때, 총알의 궤적을 계산하는 방법은 브레스넘 알고리즘을 이용하여, 복셀을 이루는 점 8개 사이에 총알을 구성하는 각 점들이 위치하는지 확인하여, 관통여부를 확인한다. 또한, 계산한 탄도

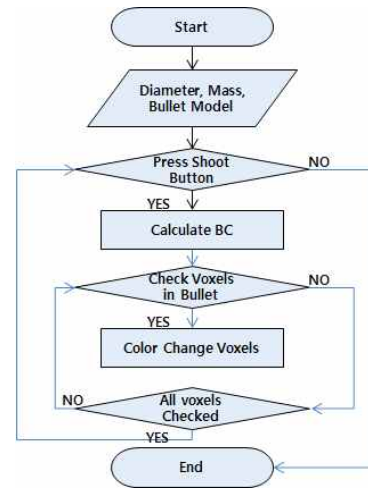
계수에 따라 공동의 크기를 조절하여 보여준다. 시스템 흐름도는 그림 5(b)에서 확인할 수 있다.

#### 2. 분석 검증

일반적으로 많이 사용되는 탄환 G1, G7을 중심으로 이들의 형상 계수 F1, F7를 정형화하였고, 그에 따른 탄의 질량 M과 직경 D를 사용자의 변수로 지정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 탄도계수에 M이 비례하는 관계라면 D 제곱값은 반비례하는 관계이다.



(a)



(b)

그림 5. 시뮬레이션 프로그램 (a)와 시스템 흐름도 (b)

Figure 5. Simulation programs in (a) and flowcharts created by OpenGL in MFC in (b)

하지만 결과적으로 탄도계수가 높으면, 탄환의 운동 에너지 보존성이 높아지기 때문에 에너지 손실률이 낮아지게 되어 관통력이 상승하게 되고, 결국 복셀에 생긴 공동의 크기는 작아지게 된다. 반대로 탄도계수가 낮다면 에너지 보존성이 떨어지기에, 관통력이 다소 줄어들게 되며 저지력이 상승해 대상에 큰 공동을 만들

수 있게 된다. 이 경우에는 복셀에 생기는 공동의 크기가 커지게 된다. 마침내 공동의 가장 큰 직경을 확인하였다면, 시각적으로 표현하기 위해 브레스넨 알고리즘을 이용하여 복셀로부터 탄환의 출입을 표현한다. 그림 6은 시뮬레이션 프로그램을 실행한 결과로, 위의 두 사진은 M과 D를 각각 12g와 4mm로 고정 시킨 후 탄환을 G1과 G7으로 설정하여 실행한 것으로 G7 모델이 G1 모델보다 탄도계수가 크고 공동이 작게 생기는 것을 확인할 수 있다. 아래의 두 사진은 탄환의 모델을 G1으로 설정한 후 왼쪽은 M과 D를 각각 8g과 6mm로, 오른쪽은 M과 D를 각각 16g과 4mm로 설정한 후 실행한 모습으로, M이 크고 D가 작을 때, 탄도계수가 커지고 공동이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

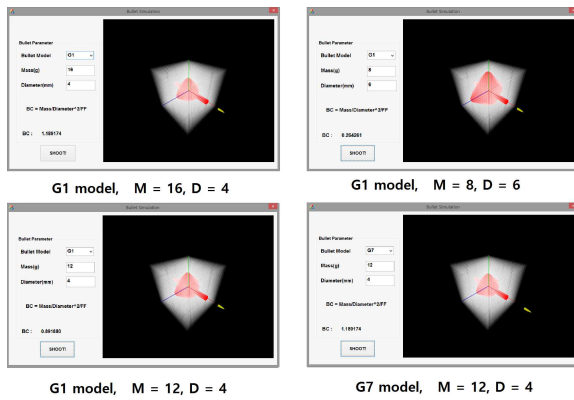


그림 6. 시뮬레이션 화면(위 줄: M과 D비교, 아래 줄: 총알 모델 비교)  
 Figure 6. Scene of Smulation (Top: Comparison of M & D, Bottom: Comparison of Bullet Model)

그림 7은 시뮬레이션에서 탄도계수에 따라 생기는 Max size of wound를 plotting 한 결과이다. Max Size of wound는 공동을 표현할 때 복셀의 최대 개수를 가지는 프레임으로 정의하였다. 탄환이 지나가면서 생기는 공동의 크기는 탄도계수로 정확하게 규정할 수 없기 때문에 본 시뮬레이션에서는 공동의 크기를 확인할 수 있도록 탄도계수를 0.2단위로 범위를 나누어 탄도계수 레벨을 1부터 8까지 설정하였다. 공동은 정해진 값의 크기부터 형성되어 프레임을 지나갈수록 커지게 되며 일정 프레임에 도달할 경우 다시 작아지게 된다.

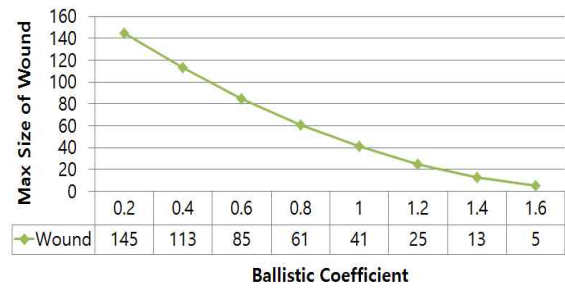


그림 7. 탄도계수에 따른 사이즈 실험  
 Figure 7. Max Size according to ballistic coefficients

### 3. 3D 공동 재현

기존의 단층 총기 탄성학 데이터에서 네 개의 3D 단층 총기 탄성학 형상을 만들기 위해 먼저 2D 좌표를 추출하여야 한다. 정확한 2D 좌표를 추출하기 위해 그래픽 도구를 사용하여 네 개의 곡선에서 각각 위아래로 그래프를 그린 후 각 10개의 좌표를 추출한다. 그리고 추출한 좌표를 스케일링하여 3D 좌표 계산에 사용한다. 메시 렌더러를 이용하여 메시를 3D 메시로 변환한다. 표 4의 Algorithm 3을 이용하여 입력된 20개의 점을 Catmull-Rom 스플라인 [10] 방정식을 이용하여 200개의 점으로 확장하여 사용하였다.

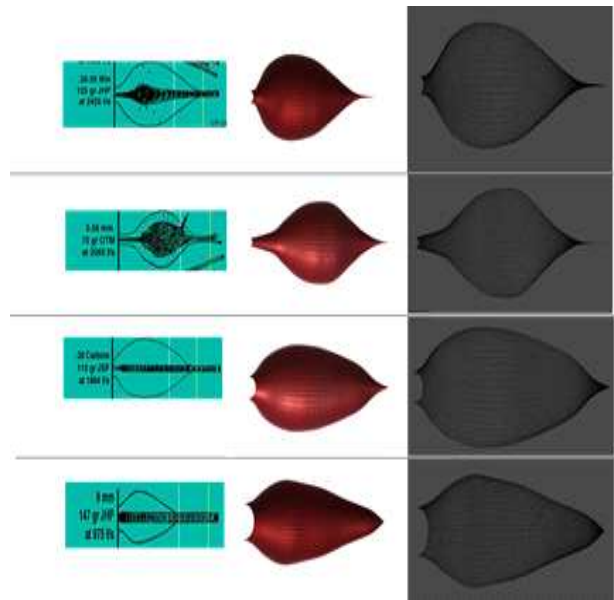


그림 8. 3D 탄흔 시뮬레이션  
 Figure 8. Terminal ballistic 3D implementation pictures

표 4. 알고리즘3: Catmull-Rom Spline

Table 4. Catmull-Rom Spline

**Algorithm 3: Catmull-Rom Spline (Cp, R)**

Input: Cp: Vector3 // 20 coordinates in 3D

Output: R: Vector3 // 200 coordinates in 3D calculated by Catmull-Rom spline

```

1 Begin
2 if Cp-Length >= 4 // Checking more than 4 control
points
3   float t; // Parameter t for the Spline
4   Vector3 P0, P1, P2, P3; // 4 control points
5   R = 0.5 * (2 * P1 + (-P0 + P2) * t + (2 *
P0 - 5 * (1 + 4 * P2 - P3) * (t * t) + (-P0 + 3 * P1
+ P3) * (t * t * t)))[1] // Catmull-Rom-Spline
6 End

```

2D로만 표현되었던 공동시뮬레이션을 스플라인 함수를 이용하여 3D로 구현하였다. 그림 8은 왼쪽에서 종단 공동의 이미지, 가운데에서는 유니티 3D를 사용하여 만들어진 종단 공동을 기반으로 만들어진 공동의 모양, 오른쪽에서는 와이어프레임 메쉬 데이터를 보여준다. 그림 8에서는 본 연구에서 제안된 3D 모델의 공동이 기존의 2D 이미지보다 더 쉽게 볼 수 있고 더 현실적임을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 탄도계수와 공동의 물리적 파라미터를 기반으로 MBA와 3D 스플라인을 이용하여 탄도의 궤적을 시뮬레이션을 설계하였다. 탄도계수를 활용하여 총알과 물체간의 직접적인 관계를 확인하였으며, 그래픽 콘텐츠를 활용하여 실제 관찰 현상의 시뮬레이션 가능성을 확인하였다. 또한, 궤적과 공동간의 직접적인 관계에서부터 화기의 특성 및 일상적 환경에서 발생하는 물리적 요소와 같은 외부적인 힘을 고려해야 한다. 이러한 파라미터들이 확립된다면 미래의 연구를 위해 보다 깊은 그래픽 알고리즘을 설계할 수 있다. 게임을 플레이하는 많은 사람들이 현실과 더 비슷한 게임을 플레이할수록 더욱 만족하고 중독되는 경향이 있다. 즉, 게임을 유명하게 하고 중독성을 높이기 위해서는 현실성을 높여야 한다는 것이다. 따라서, 본 연구에서 제안한 Unity 3D 총격 모델을 FPS 게임에 적용한다면 기존 게임보다 다양한 부상을 표현할 수 있어 시각적 현실감을 높일 수 있고, VR 게임 장르에서 현실감을 실현함

으로써 게임의 발전이 가능할 것으로 보인다.

#### References

- [1] Heckler & Koch, <https://www.heckler-koch.com/en/Products/Military%20and%20Law%20Enforcement/Assault%20rifles/HK433>, accessed 17 March 2023.
- [2] Israel Weapon Industries, <http://iwi.net>, accessed 24 March 2023.
- [3] T. Michael (Eds.), *Forensic Pathology Reviews*, Springer Science & Business Media, Vol. 4, 2007. DOI:10.1007/978-1-59259-921-9
- [4] C. Weyermann, and C. Roux, "A different perspective on the forensic science crisis." *Forensic Science International* Vol. 323, No. 110779, pp. 1-7, 2021. DOI:10.1016/j.forsciint.2021.110779
- [5] K. Park, Y. Yoochang and S. Chin. "Design of Physically-based Virtual Cavity Simulation," *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering* pp. 43-47, 2018. <http://www.wikicfp.com/cfp/servlet/event.showcfp?eventid=68415>
- [6] S.W. Sohn, D.S. Lee, S.H. Hong and Y.T. Kim, "A Study on the shape deformation of ball projectile (5.56mm) under the low velocity impact," *Proceedings of Korean Society for Precision Engineering* pp. 865-868, May 2002. <https://scieon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=N-PAP08044596&dbt=NPAP>
- [7] C. L. Farrar, D. W. Leeming, *Military Ballistics. A Basic Manual*, Brassey's, 1983. ISBN 10:0080283438
- [8] Incredible Super Slow Motion Bullet Impact! - M855A1, <https://youtu.be/fX4ODh1g4eM>, accessed 17 March 2023
- [9] S. Shukla, and B. Haider, "Monophonic music composition using genetic algorithm and Bresenham's line algorithm," *Multimedia Tools and Applications* Vol. 81, No. 18, pp. 26483-26503, 2022. DOI:10.1007/s11042-022-12185-8
- [10] E. Catmull and R. Raphael. "A class of local interpolating splines." *Computer aided geometric design*. pp. 317-326, 1974. DOI:10.1016/B978-0-12-079050-0.50020-5