

유동해석을 통한 저압 가스 건 타입 고속 충격시험기 개발

김필호¹ · 이승근² · 권오동³ · 이경훈^{4, #}

Development of Low-pressure Gas Gun Type Impact Tester using CFD Simulation

P. H. Kim, S. K. Lee, O. D. Kwon, and K. Lee

(Received June 17, 2024 / Revised July 28, 2024 / Accepted August 5, 2024)

Abstract

Supersonic aircraft and missiles often encounter damage issues due to high-speed collisions with small objects such as ice particles and water droplets. This can significantly impact the safety and performance of these vehicles, making the assessment and development of collision testing crucial. Existing collision testing methods have relied on equipment such as gas guns, which utilize high pressure. However, most accelerators for projectiles are large-scale devices designed for weaponry and high-pressure gases, rendering them inaccessible and unsuitable for laboratory use. Therefore, there is a need for research into easily accessible and economically efficient testing devices at the laboratory level. An impact tester can launch a projectile with a velocity of 100 m/s using low-pressure compressed air at approximately 10 bar. The velocity of the impact tester projectile is determined by the pressure within the chamber, friction, and the length of the barrel. In this study, computational fluid dynamics was utilized to define friction coefficients that match experimental results based on projectile weight, enabling accurate prediction of velocity. The resulting data provides practical and effective insights for the design of impact testers, utilizing the defined friction coefficients to understand and predict complex physical phenomena.

Keywords : Impact test, Low pressure gas gun, Computational fluid dynamics, Friction model

1. 서론

초음속 비행체와 미사일 등은 얼음 입자, 물방울 등과 같은 작은 물체와의 고속 충돌로 인한 손상 문제에 직면한다. 이는 물체의 안전성과 성능에 영향을 미칠 수 있어 고속 충격에 대한 평가는 매우 중요하다.

충격 시험은 재료 과학에서 중요한 평가 방법으로 급격한 하중 조건에서 재료의 거동을 확인하는데 사용된다. 이러한 시험은 항공우주, 자동차, 방위

산업 등에서는 갑작스럽고 극단적인 힘을 견딜 수 있는 재료에 대한 시험으로 필수적으로 요구된다. 이러한 조건을 모사하기 위해 고속 충격 시험기가 흔히 사용되며, 드롭 타워, 진자 해머, 가스 건과 같은 다양한 시험 장비가 사용된다. 이 중에서도 가스 건 타입 충격 시험기는 매우 높은 속도의 발사체를 만들 수 있어, 재료의 강도 및 동적 반응에 대한 연구에 적합하다.

기존 연구로는 Lee 등이 70 bar의 압력을 이용한 380 m/s의 속도를 알루미늄 평판 관통시험에 사용한 사례가 있다[1, 2]. Sakong 등은 화약을 통한 추진체를 사용하여 1 km/s의 속도 결과를 보고한 바 있다[3]. Kim 등은 표기하지 않은 특정 압력에서 15 m/s의 속도를 가스 건으로 생성하였다[4]. Kim 등은 전자기력 발사장치를 이용해 최대 400 m/s의 충돌 속

1. ㈜알앤비, 대표이사

2. ㈜알앤비, 차장

3. ㈜솔루션랩, 대리

4. ㈜솔루션랩, 대표이사

#Corresponding Author: Solution Lab. Inc.,

E-mail: Klee@solution-lab.co.kr, ORCID: 0000-0003-0239-881X

도를 확보하여 연구를 수행하였다[5, 6]. 그 외에 Jeon 등은 충격시험 발사장치에서 약 500 km/h 속도로 확보하기 위해서는 약 30 bar의 공기 압력이 필요함을 도출하였다[7].

본 논문에서는 10 bar 미만의 압력을 사용하여 발사체를 최고 속도 100 m/s까지 가속할 수 있는 가스건 타입의 고속 충격 시험기를 개발을 목표로 하였다. 개발된 고속 충격 시험기는 2차 가속을 통해 최종 충돌 속도 1000 m/s를 확보하고자 한다[8]. 이러한 충돌 속도를 가지는 고속 충격 시험기의 최종적인 개발 목적은 다층으로 구성된 박판의 파괴거동 현상에 대한 연구 능력을 확장하고 이러한 조건에서 재료의 강도에 대한 이해를 높이는데 있다. 이 고속 충격 시험기의 설계는 매우 높은 속도에 의한 발사체의 정확성, 시험의 견고한 반복성 및 안전 기준 준수를 필요로 한다.

최적의 성능을 보장하기 위해 전산 유체 역학(CFD) 시뮬레이션을 수행하였다. 이 시뮬레이션은 발사체와 주변 공기 간의 상호 작용을 중점적으로 다루며, 목표로 하는 최종 속도를 달성하기 위한 유체 역학적 분석을 제공한다. CFD 시뮬레이션의 주요 목적 중 하나는 탄환이 발사되면서 필요한 추진력을 얻기 위한 총열의 길이와 압력 챔버의 적절한 크기를 결정하는데 있다. 또한, 총열 내의 마찰력을 이해하는 것이 발사체의 가속과 최종 속도의 결정에 중요한 영향을 미쳤다. 기존 연구로는 Kim 등이 유동해석과 충격 시험기 실험 결과를 비교한 바가 있고, 실험 결과와의 10% 이상의 오차를 마찰력의 차이 등으로 설명하였다[4].

본 연구에서는 새로운 마찰 모델을 제안하고 해석 모델의 마찰 계수를 제작된 충격 시험기의 실험을 통해 조정 및 검증되었으며, 유동해석 결과를 충격 시험기의 설계 변경의 기준으로 사용하였다.

2. 문제 정의

2.1 시험 장치 설계

충격 시험기에서 탄환의 발사 방식은 10 bar 이하 저압의 진공 가압식 발사 방식을 적용하였다. 진공 가압식 발사 방식은 진공을 이용하여 고정된 발사체를 발사 순간 시험 압력이 발사체에 바로 인가될 수 있고 발사체를 고속으로 가속할 수 있으며 원격 제어를 통해 시스템의 손상과 위험요소를 줄일 수

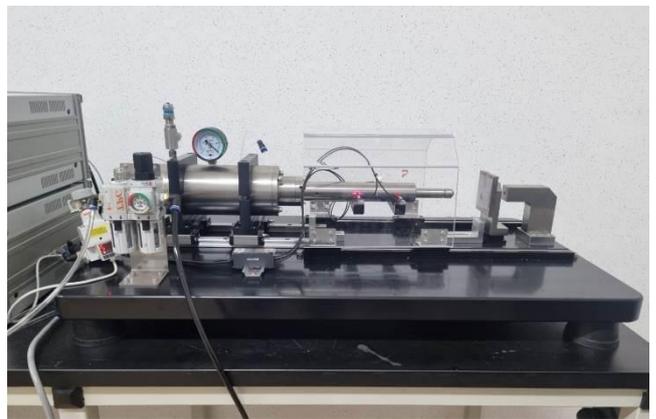
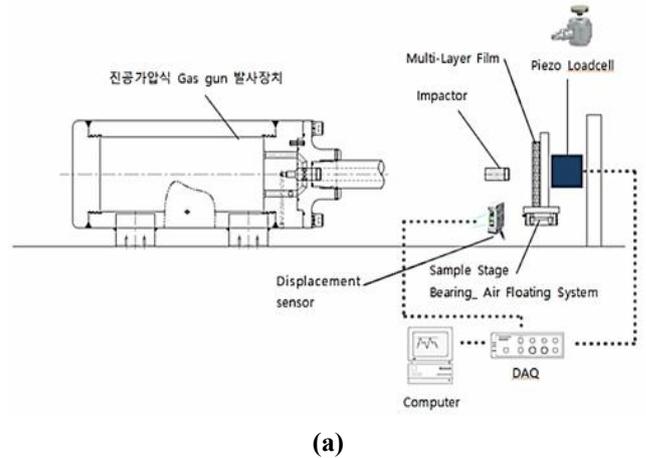


Fig. 1 (a) Schematic; (b) pictures of low-pressure gas gun type impact tester

있다. 장치의 구조는 압축 가스를 저장할 수 있는 압력 챔버와 발사체를 고정하고 발사를 유도할 수 있는 총열(barrel)로 구성되어 있다. 여기서 가속된 탄환의 속도 측정은 별도의 레이저 빔 형태의 추가 모듈에 의해 이루어진다. 속도 측정 모듈을 통과한 탄환은 시편 거치대에 설치한 시편을 타격하며 시편 거치대와 연결되어 있는 피에조(piezo) 형식의 하중센서가 측정한 하중을 기반으로 계산식에 의해 충격 에너지를 산출해 낸다. Fig. 1은 개발된 충격시험기의 개략도이다.

2.2 유동 해석 모델 설정

유동 해석은 상용 열 유동 해석 소프트웨어인 FlowVision 3.13을 사용하여 해석을 진행하였다. 탄환(bullet)은 강체(Moving body)로 설정하였고, 탄환의 특성은 질량과 총열(barrel)의 접촉 길이로 정의된다.

탄환은 한 방향으로만 운동하기 때문에 회전에 의한 요소는 모두 제거하였다. 운동 진행 방향의 반대 방향으로 작용하는 외력(External force)에 마찰 모델을 적용하였고, 공기에 의한 저항을 적용하기 위해 Hydro force를 활성화하였다. 탄환의 중심이 요구되는 위치에 도달하였을 때의 속도를 확보할 수 있도록 해석을 진행하였다. 마찰 계수의 결정을 위한 해석에서는 탄환의 속도를 측정하기 위해 설치된 2개의 레이저 센서 중간점에서의 속도를 측정하였고 최종 속도를 예측하기 위해서는 타격판에 접촉했을 때의 속도를 예측하였다. 총열의 끝 부분의 좌표 값을 사용하여 탄환이 총열을 빠져나감에 따라 공기에 의한 저항만이 작용될 수 있도록 마찰력을 제거하도록 설정하였다.

2.3 마찰 모델의 결정

탄환의 속도는 압력 챔버 내의 압력, 마찰력 그리고 총열의 길이에 따라 결정된다. 챔버 내의 압력은 초기에 결정되면 탄환이 이동함에 따라 공기의 점유 체적이 증가하면 압력이 감소한다. 마찰을 고려하지 않은 이상적인 경우 총열의 길이가 길면 더 높은 출구 속도를 가질 수 있다. 탄환에 작용하는 마찰력은 탄환의 속도에 따른 공기 저항과 총열과의 접촉에 의한 마찰력으로 정의된다. 이에 따라 마찰력은 탄환 속도와 총열과의 접촉 면적에 선형적으로 비례한다는 가정하에 수식 (1)과 같이 가정하였다. 마찰모델의 마찰계수 k는 반복된 유동 해석을 통해 실제 충격 시험기의 실험과 일치하는 최적의 값을 선정하였다.

$$F = k * V * d \tag{1}$$

여기서 F, k, V, d는 각각 마찰력, 마찰 계수, 탄환 속도와 접촉 길이를 나타낸다. 본 연구에서는 탄환의 직경이 일정하기 때문에 마찰 면적은 접촉 길이로 대체되었다.

Fig. 2와 같이 해석 모델은 축 대칭 조건을 이용하여 2도 만을 3차원으로 모델링하여 해석을 진행하였다. 해석 영역은 압력 챔버로부터 탄환의 충격 지점까지 도달하는 지점을 포함한다.

탄환 속도의 측정은 2개의 레이저 센서를 사용하여 이루어진다. 출구 부근에 위치한 2개의 레이저 센서를 통과하는 시간을 측정하고 두 레이저 센서

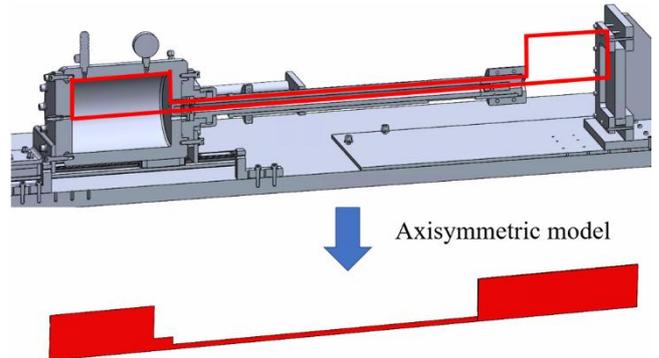


Fig. 2 Design of gas gun type impact tester and computational model for CFD

Table 1 Velocity comparison between experiment and simulation results for various bullet weights in 2 bar condition

Bullet Weights[g]	Result	Condition of Pressure [2bar]		
	Results of Measurement	Results of analysis	Error (%)	
50	15.75m/s	15.85m/s	0.6	
100	11.14m/s	11.89m/s	6	
200	7.81m/s	6.98m/s	10	
300	4.92m/s	4.61m/s	6	

사이의 거리를 계산하여 두 센서의 중간점에서의 속도를 산출한다. 충격 시험기의 실험은 탄환의 무게가 50 g, 100 g, 200 g, 300 g인 총 4가지 경우와 압력 챔버의 다양한 압력 조건(최대 3 bar)으로 진행하였다. 이 실험은 다양한 조건에서의 탄환의 운동을 이해하고 모든 조건을 만족하는 마찰계수를 결정하기 위해 설계되었다. 초기 개발된 충격 시험기의 안정성을 고려하여 최대 압력을 제한하였다. Table 1에 실험으로 얻은 속도 값과 최종적으로 정의된 마찰계수를 이용한 유동 해석 결과를 비교하여 나타내었다. 표에 나타낸 2 bar 조건의 실험과 해석 결과의 차이에서는 낮은 속도 영역에서 높은 오차 (10 % 200 g)를 보이고 있고 높은 속도 영역에서는 낮은 오차(0.6 % 50 g)을 보이고 있다. 전체 압력 범위에서의 결과 비교는 Fig. 3에 그래프로 나타내었고 전체적인 경향에서는 해석 결과가 낮은 속도 영역에서 실험과 일치하는 경향을 보이고 높은 속도 영역에서는 압력에 따라 불균일한 경향을 보였다. 불균일한 경향은 마찰모델의 한계 또는 설계 모델의 비선형성에 따른 결과로 분석하였다. 결정된 마찰 계수

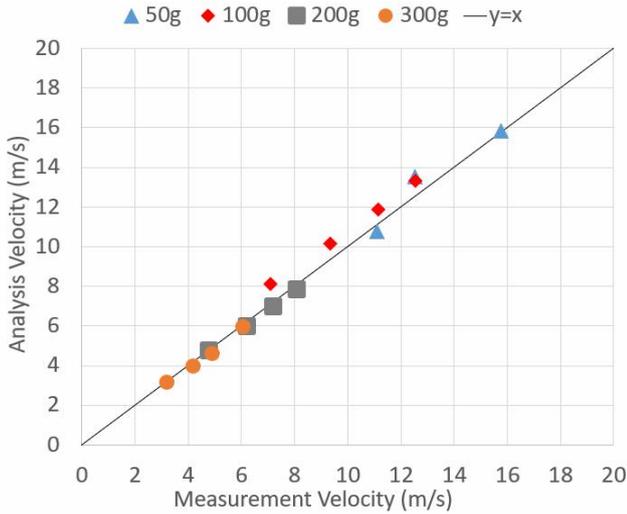


Fig. 3 Comparison of experiment results and simulation results for various bullet weight and pressure conditions

값으로 일정 오차 범위안에서 실험 결과를 예측할 수 있는 것으로 판단하였다. 결정된 마찰 계수 값은 0.1로 이후 모든 해석에 동일하게 적용하였다.

3. 결과 분석

3.1 1차 모델에 대한 해석 결과 및 분석

Fig. 4와 같이 300 g 탄환의 1 bar의 압력 조건에서의 해석에 의한 속도의 변화를 보여주고 있다. 마찰에 의해 점차적으로 속도의 증가량이 감소하는 결과를 확인할 수 있다.

유동 해석을 결과로 결정된 마찰 모델을 사용하여 충격시험기의 실험에서 확보할 수 없었던 10 bar 압력 조건에서 타격 시점의 속도를 예측하였다. Table 2와 같이 탄환의 질량에 따른 속도가 예측되었고, 탄환의 질량이 가장 작은 50 g에서 가장 빠른 46.52 m/s의 속도를 예측할 수 있었다. 따라서 현재 제작된 충격 시험기와 탄환으로는 요구되는 100 m/s 수준의 타격 속도를 달성할 수 없으리라 예측하였다.

3.2 2차 모델에 대한 해석 결과 및 분석

유동 해석에서 예측된 속도로는 요구되는 타격 속도 100 m/s에 미치지 못하기 때문에 충격 시험기의 설계 변경이 요구되었다. 마찰 모델 결정을 위한 실험 결과를 보면 탄환의 속도는 탄환의 질량에 반 비례한다. 탄환의 질량이 증가하면 접촉 면적 또한

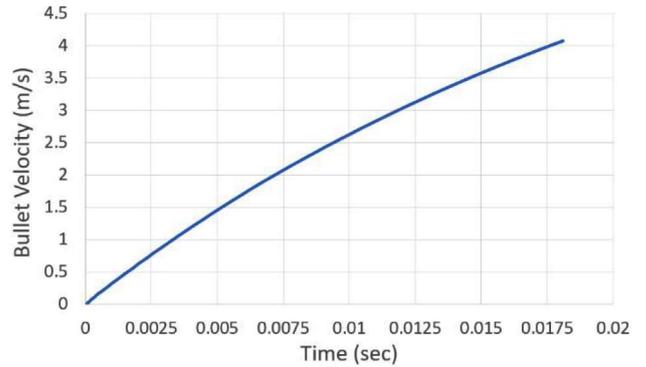


Fig. 4 Velocity profile of 300g bullet with 1bar condition

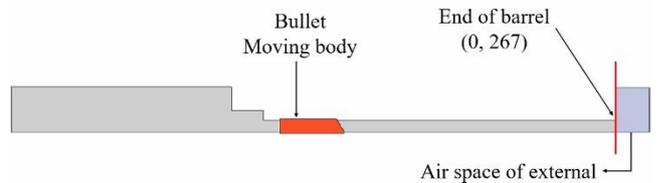


Fig. 5 Modeling of impact tester with bullet and target

Table 2 Simulation results for various bullet weight in 10bar condition

Bullet Weight[g]	Result	Condition of Pressure [10bar]
	Results of analysis	
50	46.52m/s	
100	31.93m/s	
200	20.6m/s	
300	17.78m/s	

증가하여 마찰력은 질량의 제공에 비례하게 된다. 탄환 속도는 총열의 길이에 비례하는 것으로 알려져 있다. 목표 타격 속도를 달성하기 위해 총열의 길이를 기존의 290 mm에서 465 mm로 변경하여 기존 대비 175 mm를 증가시켰고, 탄환의 소재를 플라스틱으로 변경하여 질량은 25 g으로 접촉 길이는 80 mm로 제작하였다. 마찰 모델은 기존과 동일하게 유지하고 유동 해석을 실시하였다.

설계 변경된 총열과 탄환을 사용하여 충격 시험기 실험을 실시하였고 최대 6 bar 조건까지 수행하였다. 최대 압력 6 bar에서 최대 속도 38.6 m/s를 얻을 수 있었다. 동일한 마찰 모델을 사용한 유동 해석에서는 46.5 m/s를 얻을 수 있어 실험 대비 높게 예측되었다. 이는 적용한 마찰력이 낮게 적용된 것

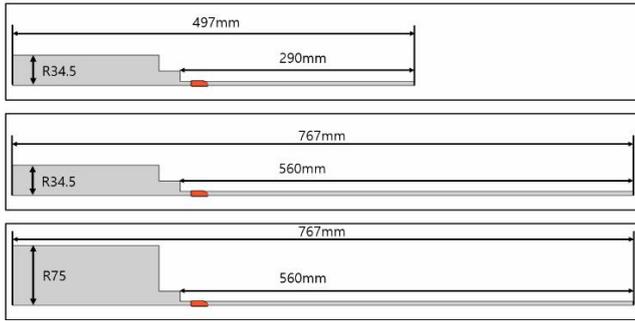


Fig. 6 Modeling change during the development of high-speed impact tester. 1st design, 2nd design and final design from top to bottom

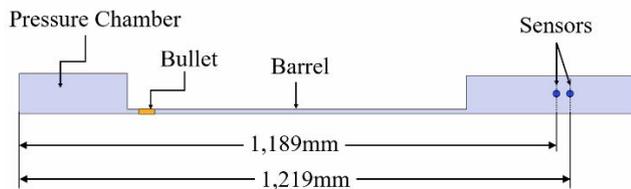


Fig. 7 Model of gun barrel and bullet for analysis

으로 볼 수 있다. 플라스틱으로 변경된 소재와 이에 따른 탄환과 총열 간의 마찰력에 적절하게 반영되지 않은 영향으로 파악하였다. 마찰 모델의 수정을 진행하지 않고 10 bar 조건에서 유동해석을 수행하였고, 67.2 m/s를 얻을 수 있었다. 이는 요구되는 100 m/s에 미달하였고 100 m/s의 확보를 위해서는 추가적인 설계 변경으로 압력 챔버의 크기를 증가시키는 방안이 요구되었다.

3.3 최종 모델에 대한 분석

목표 속도를 달성하기 위해서 압력 챔버의 크기와 탄환의 크기를 변경하였다. 압력 챔버의 직경과 길이를 2배씩 증가시켜 유동 해석을 진행하였고, 6 bar 부근에서 100 m/s를 넘는 속도를 확보할 수 있었다. 압력 챔버의 직경과 길이를 모두 증가시킨 경우와 직경만을 증가시킨 경우의 속도차가 크지 않아 초기 공기 체적의 증가에 따른 속도 증가에는 한계가 있는 것으로 판단하였다. 최종적으로 압력 챔버의 직경을 2배로 증가시키는 방향으로 충격 시험기의 설계를 변경하고 장비를 제작하였다. Fig. 6에는 1차, 2차 및 최종 설계 변경에 따른 유동 해석 모델을 비교하였다. 총열의 길이와 압력 챔버의 직경 변화를 확인할 수 있다.

Table 3 Velocity comparison between experiment and simulation with final design

Pressure	Result	Results of Measurement	Results of analysis
1		57.88 m/s	27 m/s
2		79.97 m/s	52 m/s
3		96.17 m/s	66 m/s
4		108.3 m/s	82.9 m/s
5		120.97 m/s	95 m/s
6		132.86 m/s	107 m/s
7		141.02 m/s	118.3 m/s
8		147.98 m/s	128 m/s
9		154.64 m/s	140 m/s

최종 설계 모델에서는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 레이저 속도 센서의 위치를 총열의 끝부분인 지점으로부터 떨어진 위치로 변경 설치되었다. 해석은 두 센서의 중간 점(1,204 mm)에서 종료되고, 이 때 계산된 속도를 측정된 속도와 비교하였다. 2차 가속 실험과의 연계를 위하여 탄환의 길이는 35.5 mm, 중량은 10.5 g으로 변경하였다. 챔버 압력의 변화에 따라 기존 마찰 모델을 사용한 해석과 실험을 비교하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 1~2차 제작 장비 실험을 통해 정의된 마찰 모델을 통한 유동 해석 결과는 실험과 많은 차이를 나타내었다. 특히 이전 결과 비교와 달리 해석 결과가 실험결과보다 낮게 예측되었다. 이의 원인으로서는 3차 제작 장비의 성능 향상을 위해 추가된 총열 내부에 호닝(honing)가공으로 인한 영향으로 예상되었다. 호닝 가공에 따른 마찰력 감소가 해석 결과를 실험 결과 대비 낮은 속도로 예측하게 하였다. 이후 추가적인 연구를 위해서는 호닝 가공 조건에 따른 마찰 모델의 변경이 요구되나 현 연구 단계에서는 필요하다고 판단되지 않아 수행하지 않았다. Table 3에서 보이는 바와 같이 충격 시험기 실험에서는 4 bar 조건에서 목표 속도인 100 m/s를 달성한 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 저압 가스 건 타입의 고속 충격 시험기를 설계하고 개발하였다. 이 시험기는 연구실 환경에서도 쉽게 접근할 수 있도록 설계되었으며

10 bar 미만의 저압 압축 공기를 사용하여 최고 속도 100 m/s의 발사체를 발사할 수 있도록 개발되었다. 기존의 고압 가스 건 장비와 비교하여 안전하고 경제적인 이점을 제공하며 고성능을 유지한다는 점에서 유용하다.

충격 시험기의 설계 과정에서 전산 유체 역학 (CFD) 시뮬레이션을 활용하여 최적의 설계를 도출하였다. 특히, 마찰 모델을 개발하고, 충격 실험기의 실험을 통해 마찰 계수를 조정하여 유동 해석 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 높였다. 개발 단계에서 시뮬레이션을 선행하여 설계 변경의 방향을 결정하여 개발 기간의 단축과 실험 진행에서의 가이드 라인을 제공할 수 있었다.

요구되는 속도의 달성하기 위해서는 탄환 무게 감소를 위한 가벼운 소재(플라스틱)의 사용이 요구되었고 탄두가 총열 내부에서 계속적인 가속을 확보할 수 있는 충분한 크기의 챔버의 확보가 요구되었다. 총열이 길이의 증가는 상대적으로 큰 기여를 보여주지 않았고 총열과 탄두 간의 마찰을 감소시킬 수 있는 호닝 공정의 추가가 결정적인 역할을 하였다.

개발된 충격 시험기는 다양한 재료의 충격 거동을 평가하는데 있어 매우 유용하며 항공우주, 자동차, 방위 산업 등에서의 적용될 수 있으리라 생각된다.

본 연구의 최종 목적인 2차 가속을 통한 1000 m/s 달성을 위한 1차 연구로서의 성공적인 결과로 판단되었다.

후 기

본 연구는 산업 통상 자원부, 방위 사업청 국방 기술 상용화 지원 사업(22-DC-ME-02)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] G.H. Lee, S.W. Kim, S.Y. Lee, 2023, A Study on Characteristic of Strain Rate for Metallic Material and Engine Containment Evaluation by High-Velocity Impact Experiment, Journal of Aerospace System Engineering. 2023 Fall Conf., Jeju, pp. 322-323.
- [2] S.Y. Byun, S.H. Ahn, J.W. Baek, S.Y. Lee, J.H. Roh, I.Y. Jung, 2022, High-Velocity Impact Behavior Characteristics of Aluminum 6061, J. Kor. Soc. Aeronaut. Space, Vol. 50, No. 7, pp. 465-470. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.7.465>
- [3] J. Sakong, S.C. Woo, J.Y. Kim, T.W. Kim, 2017, Study on Material Fracture and Debris Dispersion Behavior via High Velocity Impact., Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 41, No. 11, pp. 1065-1075. <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.11.1065>
- [4] J.S. Kim, H.R. Gwak., 2017, Development for a Pneumatic Projection Device for the Missiles, J. Adv. Eng. and Tech., Vol. 10, No. 2, pp. 219-224.
- [5] H.K. Kim, E.T. Park, W.J. Song, B.S. Kang, J. Kim., 2019, Experimental and numerical investigation of the high-velocity impact resistances of fiber metal laminates and Al 6061-T6 by using electromagnetic launcher, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 33, No. 3, pp. 1219-1229. <http://doi.org/10.1007.s12206-019-0222-4>
- [6] H.K. Kim, B.S. Kang, J. Kim, 2019, High Velocity impact resistance test of fiber metal laminate (FML) by using electromagnetic launcher and its numerical analysis, Journal of Aerospace System Engineering. 2019 Spring Conf., Kosung, pp. 129-131.
- [7] H.K. Jeon, C.K. Park, J.W. Seo, C.S. Jeon, A Study on Impact Testing of a Rolling-stock Windscreen, 2013, J. Kor. Soc. Rail., Vol. 16, No. 5, pp. 365-371.
- [8] D.H. Jin, D.T. Chung, C.Y. Park, I.S. Rhee, 2013, Development of Mini Ball Acceleration System for High-Speed Impact Experiment, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., pp. 1899-1903.
- [9] J.Y. Chang, N.S. Choi, 2009, Surface Fracture Behaviors of Unidirectional and Cross Ply Glass Fiber/Epoxy Lamina-Coated Glass Plates under a Small-Diameter Steel Ball Impact, Kor. Soc. Comp. Mater., Vol. 22, No. 4, pp. 33-40.