

포신 길이와 탄약 압력에 따른 포신 내부 유동 특성 연구

정희철*, 김경록¹, 강요한¹, 반영우², 정덕형²
¹국방기술품질원, ²(주)풍산

A Research on Characteristics of Internal Flow Based on the Gun Barrel Length and Ammunition Pressure.

Hee-Chur Jung^{1*}, Kyoung-Rok Kim¹, Yo-Han Kang¹, Young-Woo Ban², Duck-Hyeong Jung²

¹Defense Agency for Technology and Quality, Jinju, Korea

²Poongsan, Seoul, Korea

요약 본 논문은 포신의 길이 및 발사되는 탄약의 압력에 따른 포신 내부 및 배연기의 유동 특성에 대한 연구 내용이다. 탄약 설계 전 포신길이 및 탄약 압력에 따른 배연기의 유동 특성을 분석함으로써 탄약 운용 간 발생할 수 있는 Flareback 현상을 사전에 예방 할 수 있으며, 기존 탄약의 설계 요소인 속도, 정확도, 관통성능, 사거리 외에 운용성 향상을 위한 포신과 탄약의 호환성이 탄약 설계의 주요 요소임을 추가로 도출하였다. 유동 해석 수행 결과 포신 길이가 길고, 사격되는 탄약의 압력이 낮을수록 포신의 배연기 작동시간이 느려져 전투차량 내부로 추진제 가스가 들어올 확률이 높아짐을 확인하였다. 따라서, 본 연구를 통해 확인 된 포신 길이 및 탄약 압력에 의한 배연기 유동 특성 상관관계 해석 기법은 신규 탄약 설계 시 운용성 향상을 위한 주요 요소로 고려되어 탄약의 무게 결정과 추진제 압력 선택에 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

Abstract This research concerns the characteristics of tank barrel inner flow according to the barrel length and the pressure of ammunition when fired. By analyzing the flow characteristics of the bore evacuator according to barrel length and ammunition pressure regarding ammunition design, it is possible to prevent the flareback phenomenon that may occur during ammunition operation. Through bore evacuator flow analysis by barrel length and ammunition pressure, we identified key design factors concerning barrel and ammunition compatibility including speed, accuracy, penetration performance and range. Test results found if barrel length is long and ammunition pressure is low, bore evacuator operation time is slow. Therefore, there is a high probability that propellant gas will enter the battle vehicle. Therefore, the correlation analysis method of bore evacuator flow characteristics based on barrel length and ammunition pressure is considered as a primary method to improve operational performance. When designing new ammunition, the correlation analysis method will be used to determine ammunition weight and select the propellant pressure.

Keywords : Bore evacuator, Flow characteristic, Ammunition pressure, Tank barrel length, Ammunition design

1. 서론

전투차량은 단일 포신에서 사용 목적에 따라 여러 종류의 탄약을 발사하게 되는데, 전투차량 탄약 설계 시 포신이 견딜 수 있는 허용압력 내에서 군의 요구 성능을

만족 시킬 수 있도록 탄약의 속도, 압력, 정확도, 관통 특성 등의 주요 요소가 검토되어 개발된다. 하지만 실제 전투차량의 운용 간 발생 할 수 있는 배연기 작동 성능 및 강내 유동 특성과 같이 포신과 탄약의 호환성 부분에 대한 요소는 탄약 개발 시 충분히 반영되지 않는다. 예를

*Corresponding Author : Hee-Chur Jung(Defense Agency for Technology and Quality)

Tel: +82-53-757-3028 email: heechur@dtaq.re.kr

Received August 27, 2018

Accepted November 2, 2018

Revised (1st September 7, 2018, 2nd September 21, 2018)

Published November 30, 2018

들어 탄약 설계 측면에서 전투차량의 포신 길이가 길어지면 사격 후 추진제 연소 압력이 포탄에 전달되는 시간이 늘어 운동에너지가 증가하게 되고, 이는 탄약의 비행 사거리와 관통성을 높이는 효과가 있다. 또한 동일 포신에 추진제 연소 압력이 높은 탄약을 사용하게 되면 압력이 낮은 탄약보다 더 많은 에너지가 탄약에 전달되어 사거리 및 관통 성능이 향상 된다. 하지만 전투차량의 운용 측면에서는 포신의 길이 증가는 곧 포신 내부의 체적 증가로 이어져 포신 내부 압력 및 배연기 작동 성능에 영향을 미칠 수 있으며, 사격되는 탄약 종류에 따른 압력 차이로 배연기의 동작 특성의 차이가 발생되어 추진제 가스가 전투차량 내부로 유입되어 전투차량 운용상 문제가 발생 할 수 있다. 국외 연구 자료 확인 결과 탄약 사격 후 포신 약실 내 초기 압력이 배연기 성능에 미치는 영향 및 배연기의 작동 특성 연구[1-3], 배연기 조립 조건에 따른 배연기 특성 연구[4]에 대한 자료는 존재하나, 포신길이와 탄약 압력에 따른 운용 호환성에 대한 연구 부족으로 운용 호환성 측면의 기술적 검토가 요구된다. 전투차량 포신의 배연기(Bore Evacuator)란 사격 후 포신 내부에 남아 있는 탄약 추진제 가스를 외부로 배출시켜 주는 장치로 Fig. 1과 같이 포신에 장착된다. 배연기는 주로 유리섬유로 제작 되며, 작동 원리는 Fig. 2와 같다. 먼저 폐쇄기(Breech Block)가 닫힌 상태에서 탄약 사격으로 추진제가 연소되면 추진제의 압력에 의해 탄약이 포신 전방으로 이동하게 된다. 이때 배연기는 포신과 노즐로 연결되어 있어 탄약이 포신의 노즐 위치를 지나 가게 되면 노즐로부터 추진제의 압력이 배연기로 전달되어 압력이 충전 되기 시작한다. 배연기에 충전 된 압력은 탄약이 포신을 벗어난 후 다시 노즐로 나와 포신 밖으로 나오게 되면서 포신내부에 있던 추진제 잔여 가스를 외부로 밀어내게 된다. 포신 내부 가스가 배연기에 의해 외부로 배출되면 폐쇄기가 개방되면서 탄피가 추출되게 된다.

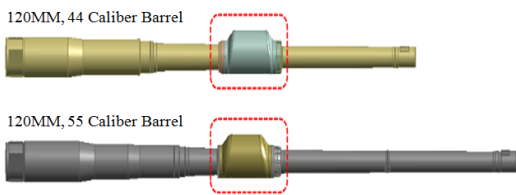


Fig. 1. Bore Evacuator

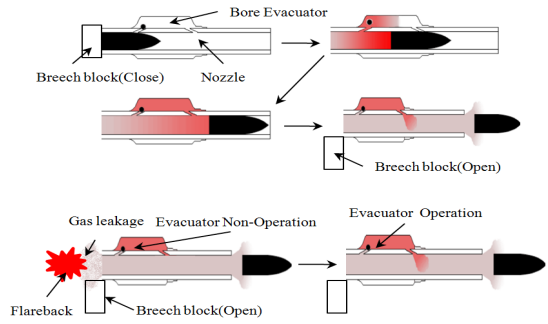


Fig. 2. Bore Evacuator Mechanism and Flareback Phenomenon

탄약 배연기가 원활하게 작동하지 않게 되면 사격 후 폐쇄기가 열린 후 탄피 제거 시 추진제 가스가 전투차량 내부로 유입될 수 있으며 오염물질에 의해 포신 수명 및 전투차량 운용 병사의 건강에 영향을 줄 수 있다. 추진제 가스는 수소(H₂), 일산화탄소(CO), 메탄(CH₄) 등으로 구성되며 산소와 혼합 될 경우 전투차량내부 폐쇄기 후 방에서 화염이 발생 할 수 있다. 이러한 화염을 플래어백(Flareback) 또는 후방섬광(Flashback)이라고 한다. Flareback 현상은 탄의 사격 후 배연기 작동 전 아주 짧은 시간 안에 발생하며, 주로 배연기의 노즐이 사격에 따른 이물질로 막히거나 배연기의 파손으로 발생한다[6]. 하지만 탄약 설계 시 포신과 탄약의 호환성 부족으로 발생할 가능성도 있다. 전투차량의 탄약 장전 방식은 병사가 직접 장입하는 수동 장전 방식에서 기계적으로 장입하는 자동장전 방식으로 발전하면서, 폐쇄기 개폐 속도가 빨라지고 있다. 이는 배연기가 완전히 작동하기 전에 폐쇄기가 열릴 경우 전투차량 내부로 추진제 연소가스 들어갈 확률이 높아졌다는 것을 의미하므로, 탄약의 설계 시 장비와의 호환성이 매우 중요한 요소로 도출되고 있다. 이러한 호환성 분석은 실제 사격을 통해 가능하나 배연기 및 포신 강내 특성 데이터 확보를 위한 계측장비 설치 및 분석이 매우 어렵고 많은 비용과 시간이 소요되며 폭발물 취급으로 인해 안전사고의 우려가 크다. 이러한 사유로 포신과 탄약의 호환성 분석을 효과적으로 수행하기 위해 유동 해석 시뮬레이션을 통한 검토 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 포신길이 및 탄약 압력에 따른 배연 특성 분석을 위해 시간 변화를 고려한 1자유도 강제 동역학 및 전산유체해석의 연성해석을 수행하였다. 해석 된 결과를 통해 포신 길이 및 탄약의 압력 차이에 따른 포신 내부와 배연기의 작동특성에 미치는 영향을

분석하였다.

2. 본 론

2.1 수치해석 방법

2.1.1 수치해석 모델

본 해석에서는 포신 및 탄두의 형상 모델을 Fig. 3과 같이 2차원으로 형상을 단순화 하였다. 탄약과 장비의 호환성에 따른 배연 특성의 객관적인 비교를 위해 포신 길이와 탄약 압력 외의 외부 환경적 요인은 배제 하였다.

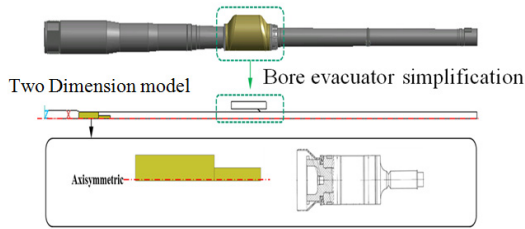


Fig. 3. Barrel Two Dimensional Axisymmetric Simplification

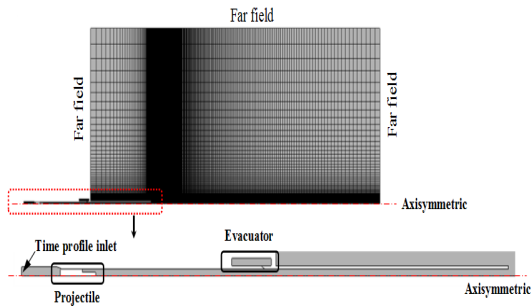


Fig. 4. Barrel Node Modeling

해석에 사용된 모델은 Fig. 4와 같이 포신 내부, 배연기 및 외부의 자유류 영역을 포함하였다. 모델은 포신 길이별 유동 특성 및 탄의 거동 특성을 비교하기 위해 44구경장과 55구경장 두 가지로 구성하였다. 해석 모델에서 노즐의 면적은 실제 포신의 배연기 노즐 면적을 적용하였으나 2차원 축대칭 해석이기 때문에 기하학적 상사는 불가능하다. 따라서 실제 3차원 노즐 형상과 해석결과 차이가 발생하며 해석결과 분석은 정성적으로 접근해야 한다. 해석에 사용한 격자는 Fig. 5와 같이 정렬격자

로 사용하였고 격자수는 151,259개로 구성하였다. 탄은 중첩격자(Overset grid)를 사용하여 포신 내부와 자유류 부분에서 1자유도 거동이 가능할 수 있도록 구성하였다.

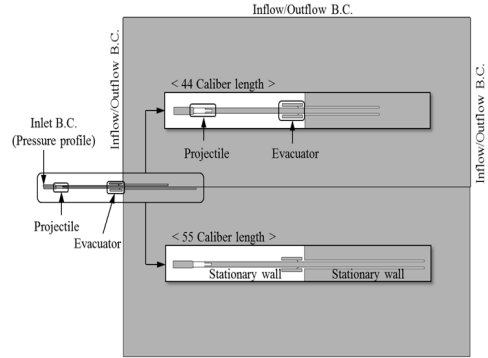


Fig. 5. Geometries of Gun Barrel and Boundary Conditions

2.1.2 수치해석 방법

해석에서 사용한 방정식은 연속방정식, 상태방정식, 운동량 방정식, 에너지방정식을 고려하였으며 그 수식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$p/\rho = (R/W)T \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = 0 \quad (4)$$

여기서, t 는 시간, x_i 는 i 방향 좌표계, u_i 는 i 방향으로의 순간 가속도, u_j 는 j 방향으로의 순간가속도를 의미하며, ρ 는 밀도 P 는 압력을 나타낸다.

또한, 상대운동이 있는 비정상상태 유동장 해석을 위해 아래와 같이 적분형태인 오일러(Euler)방정식을 사용하였다.

$$\frac{d}{dt} \int_V Q dV + \int_S (\vec{F}_c - Q \vec{V}_g) \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (5)$$

여기서 $Q = (\rho \rho u \rho v e_0)^T$ 이다. 또한 V 는 체적을 나

타내고, S 는 제어표면, \vec{n} 은 바깥방향으로의 법선벡터, V_g 는 격자의 속도를 나타낸다. 점성 유속 벡터를 계산하기 위해 Roe의 상류 차분기법을 적용하였으며, 시간은 국소시간진전 기법을 사용하여 해석을 수행하였다. 사용프로그램은 전처리(CFD-GEOM), 계산(CFD-FASTRAN 압축성 기반 솔버), 후처리(CFD-VIEW)를 적용하였다.

2.1.3 포신내 압력 경계조건

포신내 압력 경계조건은 Fig. 6의 P-T 선도를 적용하여 44구경장과 55구경장에 동일 경계를 조건으로 적용하였다.

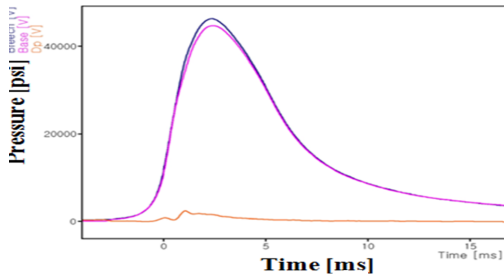


Fig. 6. Barrel P-T Graph

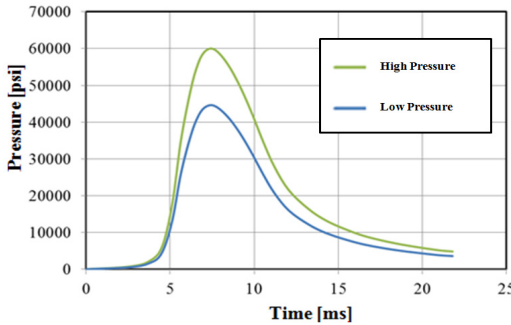


Fig. 7. High/Low Pressure Ammunition P-T Graph

또한 탄약에 대한 압력 경계조건은 Fig. 7과 같이 고압탄(60,000psi) /저압탄(45,000psi)의 실제 사격 시 측정된 탄약의 약실 내 압력 선도를 적용하였다. 연소가스의 온도(3,054.1K), 비열비(1.2425), 분자량(23.326 kg/mol)은 CEA코드의 결과 값을 적용하였고 포탄은 실제 사용하는 탄의 질량 물성을 고려하여 해석하였다.

2.2 해석 결과

2.2.1 포신길이에 따른 강내 유동특성 분석

Fig. 8은 120MM 44구경(길이 : 120mm × 44) 및 55구경(길이 : 120mm × 55) 포신에서 평균 약식압력이 45,000 psi인 동일 탄약 사격 후 시간에 따른 탄약의 거동 및 포신 내부, 배연기의 압력장을 나타낸 해석 결과이다.

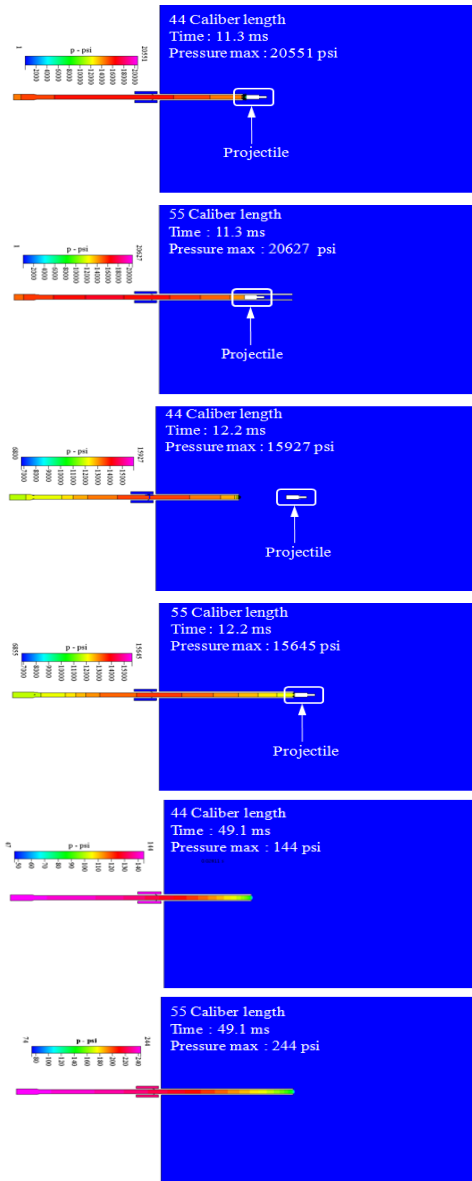


Fig. 8. Pressure Contours Comparison between 44 Caliber Length and 55 Caliber Length per time

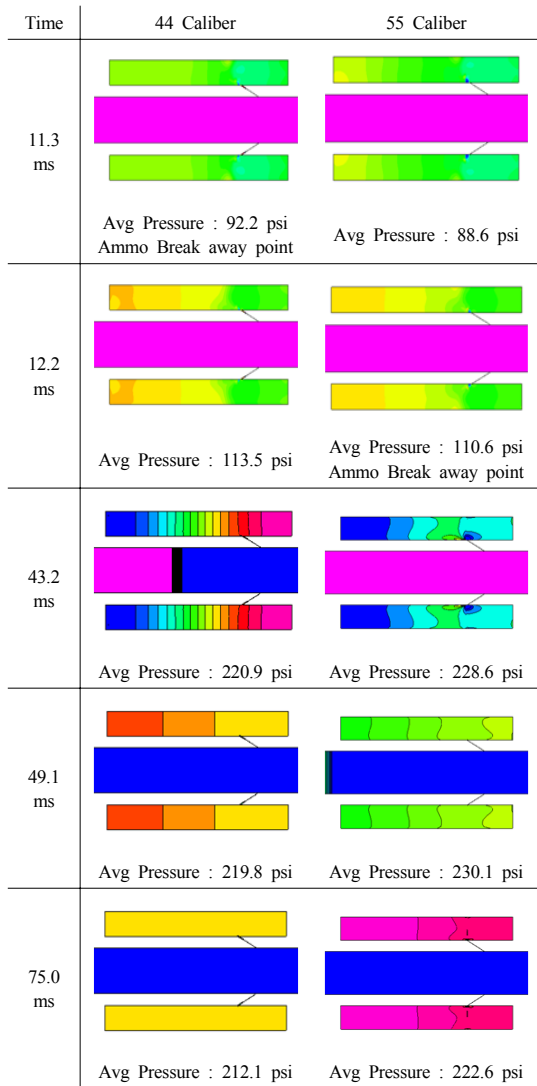


Fig. 9. Bore Evacuator Pressure Contours Comparison between 44 Caliber Length and 55 Caliber Length per time

동일 압력의 탄약이 사격 될 경우(탄약 속도 동일) 포신 길이가 짧은 44구경에서 탄약의 포신 이탈이 빠르며, 동일 시간 포신 내부 압력은 55구경 포신 압력이 높은 것을 확인 할 수 있다. 시간별 44구경장 및 55 구경장 배연기 내부의 압력에 대한 해석결과는 Fig. 9와 같다.(2차원 축대칭 모델을 적용하였기 때문에 배연기 내부 실제 압력은 해석결과와 상이할 수 있다.) 해석결과 동일 압력 탄약 사격 시 포신의 길이에 따라 시간대별 배연기 내부 압력 및 배연기 작동 시간이 차이가 있음을 확인할 수

있다. 44구경장의 경우 43.2ms에서 배연기 압력이 최대가 된 후 배연작동이 시작되며, 55구경장의 경우 49.1ms에서 압력이 최대가 되고 배연 작동이 시작된다. 배연기의 최대 압력이 55구경장이 더 높은 이유는 탄의 포신 이동 길이가 길어 배연기에 압력이 충전되는 시간이 44구경장보다 더 길기 때문이다.

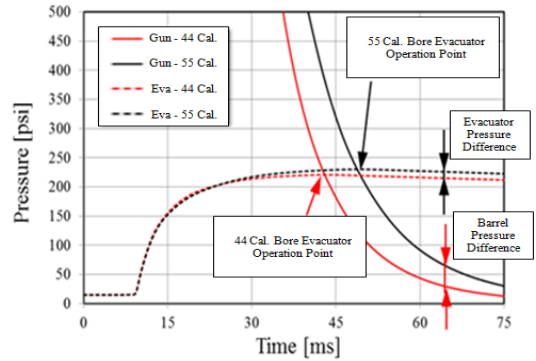


Fig. 10. Pressure in Gun Barrel and Evacuator with the Variation of Time

Fig. 10은 포신 길이 차이에 따른 배연기의 평균 압력(점선)과 배연기 내부 압력(실선)을 나타낸 결과이다. 포신 길이 차이로 포신 내부의 압력은 55구경 포신이 44구경 포신에 비해 높게 형성되고 배연기 내부 평균 압력도 55구경장이 높음을 확인 할 수 있다. 이때 배연기의 압력은 탄약의 포신 이탈 이후에도 포신 내부에 잔류하는 압력이 계속 유입되어 배연기의 압력이 지속적으로 증가한다. 배연기의 작동시점은 탄의 이탈 속도가 빠른 44구경장에서 약 5.9 ms 먼저 작동한다. 따라서 동일 압력 탄약 사격 시 포신길이가 짧을수록 배연기 작동 시점이 빠른 것을 확인 할 수 있다.

2.2.2 탄약 압력에 따른 강내 유동특성 분석

Fig. 10은 동일 55구경장 포신에서 압력이 다른 두가지 저압탄(45,000psi) 및 고압탄(60,000psi) 사격을 가정 후 시간에 따른 탄약의 거동 및 포신 내부, 배연기의 압력장을 나타낸 해석 결과이다. 포신내부 압력 해석결과 속도가 빠른 고압탄의 경우 11.8ms에서 탄약이 포신을 이탈하고, 저압탄의 경우 12.2ms에서 탄약이 포신을 이탈함을 확인할 수 있다. 포신 내부의 압력은 고압탄이 시간대별로 저압탄 대비 높은 것을 확인 할 수 있다.

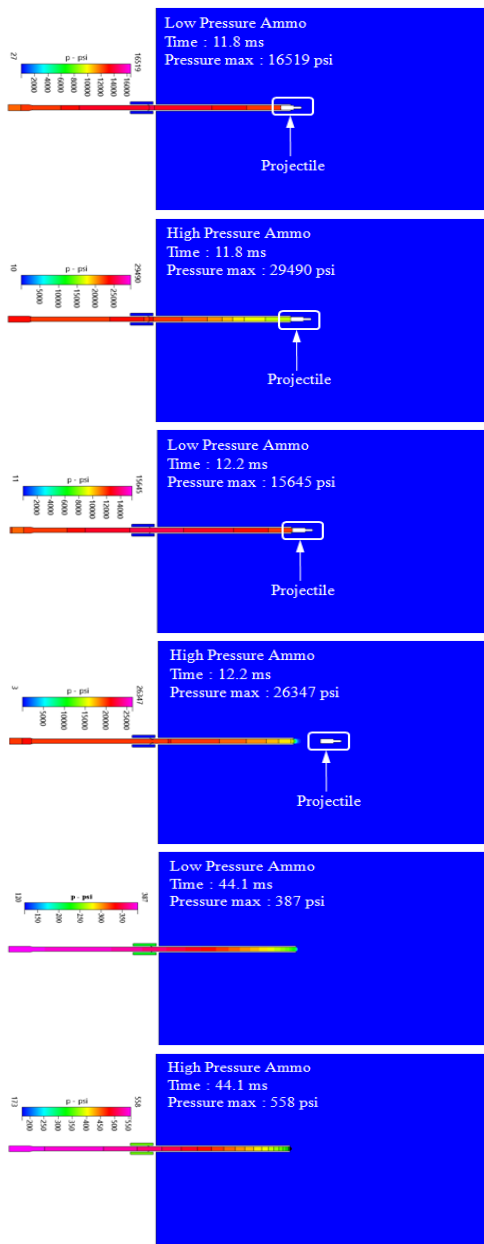


Fig. 10. Pressure Contours Comparison between Low and High Pressure Ammo per time

Fig. 11은 45,000 psi 저압탄과 60,000 psi 고압탄 사격 시 시간대별 배연기 내부의 압력 형성에 대한 해석결과로 저압탄의 경우 49.1ms에서 압력이 최대가 되고 배연 작동이 시작되며 고압탄의 경우 48.2ms에서 압력이 최고가 되고 배연 작동이 시작된다.

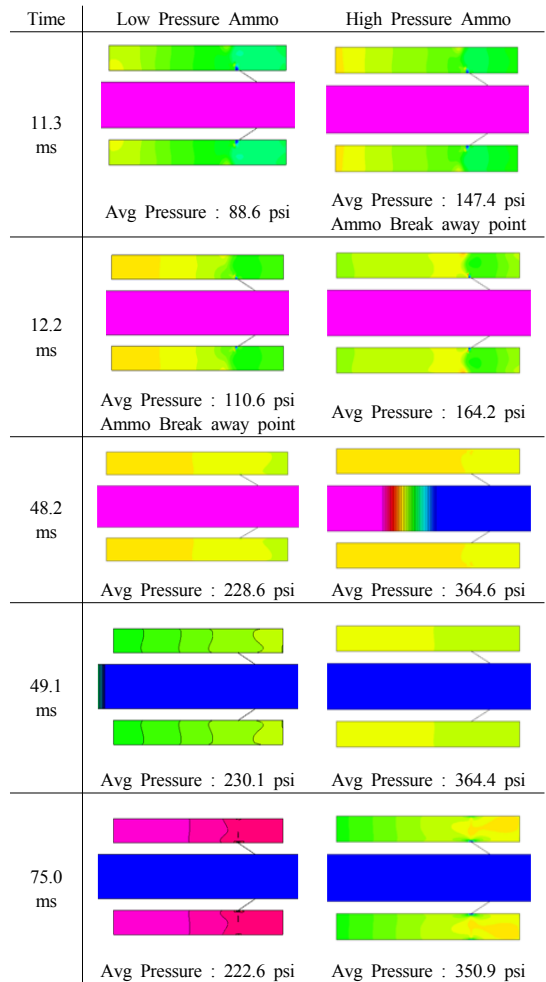


Fig. 11. Bore Evacuator Pressure Contours Comparison between Low and High Pressure Ammo per time

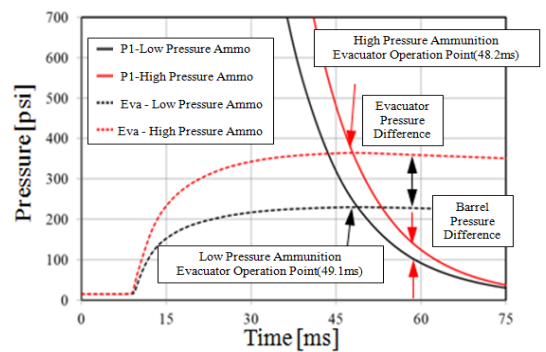


Fig. 12. Pressure in Gun Barrel and Evacuator with the Variation of Time

Fig. 12는 탄약압력 차이에 따른 동일 포신 배연기의 평균 압력(점선)과 배연기 내부 압력(실선)을 나타낸 결과이다. 고압탄의 경우 배연기 최대 충전 압력이 저압탄 대비 높으며 배연기에서 작동 시점도 약 0.9ms 빨리 시작된다. 따라서 배연 성능의 경우 발사되는 탄약의 약실 압력이 높을수록 가스 배출에 유리한 것을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 시간 변화를 고려한 포신 길이 및 사격되는 탄약의 압력 차이별 강내 유동특성을 분석하였다. 포신 길이 및 사격되는 탄약의 압력에 따라 탄약의 이탈 시점, 배연기의 충전 압력 및 작동시간에 영향이 있는 것을 확인하였다. 포신길이가 짧고 탄약의 압력이 높을수록 배연기 작동시간은 빠르다. 또한, 동일포신의 경우 탄약의 압력이 높을 경우 배연기의 압력도 높아 포신 배연 성능이 향상됨을 확인되었다. 이러한 해석 결과는 기존 탄약 개발 시 속도, 정확도, 관통성능, 비행성능에 국한된 탄약의 기본적 설계요소에서 포신 배연기 작동 성능에 대한 장비와 탄약의 호환성 측면이 주요 설계 요소로서 추가 검토 되어야 한다는 것을 의미한다. 본 논문에서 수행한 해석방법은 2차원 기준으로 실제 포신 및 배연기 유동특성과는 차이가 있을 수 있으나, 탄약 개발 시 배연기 및 포신 강내 유동해석 기법 적용을 통해 기존 양산되어 운용되고 있는 탄약과 신규 개발 탄약의 유동 특성을 설계 단계에서 비교 할 수 있다. 현재 군에서 운용중인 강내 유동에 특이사항이 발생하지 않은 기존 탄약의 충분한 실사격 운용 데이터를 바탕으로, 신규 개발 탄약의 유동해석을 비교를 통해 개발 탄약이 실제 전투차량 운용 시 나타날 수 있는 배연 특성을 예측하고, 보완 및 개선을 통해 Flareback과 같은 현상을 미연에 방지하는 방안으로 활용 할 수 있다.

본 연구를 통해 탄약 설계 시 강내 유동 특성을 고려한 포신-탄약 호환성 설계 요소 추가 도출로 국내 개발 탄약에 대한 개발 품질 향상에 도움이 될 것으로 판단되며, 신규 탄약 설계 시 강내 유동 특성을 고려한 탄의 무게 결정 및 추진제 압력 결정 등에 효과적인 활용이 가능 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Pei and Foo, "Modeling and Simulation of the Gas Charging and Discharging Process on Gun Bore Evacuator", IBS, Vol.7-11, pp.281-286, 2001.
- [2] C.A. Andrade, et al, "Theoretical Compressible Flow in Generic Bore Evacuators and Experimental Verification", AIAA, pp. 89-0652, 1989.
- [3] C.A. Andrade, et al, "Cannon Bore Evacuator Flow Theory,CFD, and Experimental Verification", AIAA, pp. 92-0832, 1992.
- [4] David A. Porter, "Characterization of M256 Bore Evacuator Performance, Technical Report". ARCCB-TR-91023, U.S.Army ARDEC, Benet Laboratories, 1991.
- [5] US Army, "PS Magazine The Preventive Maintenance Monthly", TB 43-PS-682, pp.2-3, 2009.

정 희 철(Hee-Chur Jung)

[정회원]



- 2011년 2월 : 경북대학교 기계공학과 (학사)
- 2010년 10월 ~ 2012년 11월 : 한 국항공우주산업 사원
- 2012년 12월 ~ 현재 : 국방기술품 질원, (현) 선임연구원

<관심분야>

기계, 구조 해석, 유체

김 경 록(Kyoung-Rok Kim)

[정회원]



- 2014년 9월 : 경북대학교 전자공학부 (학사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품 질원, (현)연구원

<관심분야>

포신 설계 및 제어, 신관

강 요 한(Yo-Han, Kang)

[정회원]



- 2009년 2월 : 한양대학교 응용화학
과 (학사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품
질원, 현)연구원

<관심분야>

화공, 기계구조 해석

반 영 우(Young-Woo Ban)

[정회원]



- 2010년 2월 : 한국교통대 항공·기
계설계 학과 (학사)
- 2015년 8월 : 건국대학교 기계설계
학과 (석사)
- 2010년 3월 ~ 2016년 4월 : 경원
이앤씨 연구원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 현)풍산 연구원

<관심분야>

기계, 유체

정 덕 형(Duck-Hyeong Jung)

[정회원]



- 2009년 2월 : 순천향대학교 정보기
술공학 (학사)
- 2013년 2월 : 한양대학교 금속재료
전공 (석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 현)풍산 연구원

<관심분야>

금속, 재료, 구조 역학