

전장축소형 무화염 소염기 형상설계 연구

A Study on Designing Flash Hider to Shorten the Length of Small Arms

김 현 준* 이 준 호* 채 제 옥* 이 성 배* 김 인 우*

Hyun-Jun Kim Joon-Ho Lee Je-Wook Chae Sung-Bae Lee In-Woo Kim

Abstract

This paper includes that there are results of designing the flash hider and analyzing fluid dynamics of a front area of the barrel to shorten the length of small arms. Generally, the muzzle flash can be generated out of the barrel by the reaction between the oxygen in the air and unburned gunpowder contained in the propellant gas if a barrel is not long enough to burn gunpowder fully inside of the barrel. Though, the hugh muzzle flash, which is a characteristic of small arms with short barrel length, caused a soldier to aim at the target at night by making the soldier blind for a while and endangers his life by revealing firing position to enemies. Besides, the heat of muzzle flash can weaken the performance of thermal sights, which are attached to small arms for night battlefield. In this paper, flash hidere with several different shapes were designed for a newly developed 5.56mm caliber rifle with short barrel length. The performance of each flash hider to reduce the muzzle flash was compared theoretically and experimentally. Through the authorized test procedure, a highly efficient design of flash hider for reducing the muzzle flash was identified. The result of the paper can be helpful when designing flash hidere for small arms with short barrel length.

Keywords : 마하디스크(Mach Disk), 소염기(Flash Hider), 소화기(Small Arms), 총구화염(Muzzle Flash)

1. 서론

지금까지 소구경화기에 있어서 개발의 형태는 소화기를 개발한 후에 그에 맞는 탄약을 개발하거나, 탄약을 개발한 이후 그 탄도 특성 및 운용에 적합한 형태의 총을 개발하는 것이 주된 연구방식이였다. 그러나 K11 복합형소총의 경우 운용성 향상을 위해 기존

의 K2 총열장에 적합한 탄약인 K100탄 및 KM93탄을 그대로 사용하는 것을 고려하였다. 그러나 복합형소총의 운용성을 높이기 위한 경량화, 단신화를 진행하면서, 짧은 총열 길이로 인한 사용탄약의 연소특성 및 탄도학적 특성을 고려하기 어려운 면을 가지고 있었다. 그리고 기존의 K2 및 M16에 사용되는 소염기를 K11 복합형소총에 그대로 적용할 경우 총구 부근에 화염이 심하게 발생하여 아군의 기도비너를 유지할 수 없게 되며, 사수 및 아군의 시야를 일시적으로 가리는 현상이 발생하였다. 그리고 특히 사격통제장치 열상화면이 근거리에서 발생하는 과다 화염으로 인해 일시적

† 2011년 8월 31일 접수~2011년 11월 25일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김현준(hyunjuns@add.re.kr)

으로 하얗게 변하는 현상(열화현상)이 발생하여 사격 통제장치를 고정으로 부착하여 운용하는 K11 복합형 소총의 야전운용상 중요한 문제점으로 파악되었다. 그리하여 본 연구는 기존의 총열장 증대방식 소염기 제작으로 인한 화염제거 기법과는 다른 방식인 소염기의 중량과 전장을 동시에 축소시키면서 화염제거가 가능한 소염기 설계에 대한 이론적 기구학적 분석을 수행하고 탄의 불완전 연소에 따른 화염발생의 원인을 제거하는 방향으로 연구를 수행하였다.



Fig. 1. 총열 단산화 설계에 따른 불완전 연소를 화염 저감형 소염기로 제어

2. 연구방법

본 연구에서는 우선 K100 및 KM193탄에 들어가는 추진제의 연소특성을 기반으로 기존의 소염기 연구결과(화포분야) 분석 및 K100탄의 강내의 탄도 및 추진제 특성 연구를 통해 화염 저감 연구방향에 대해 분석

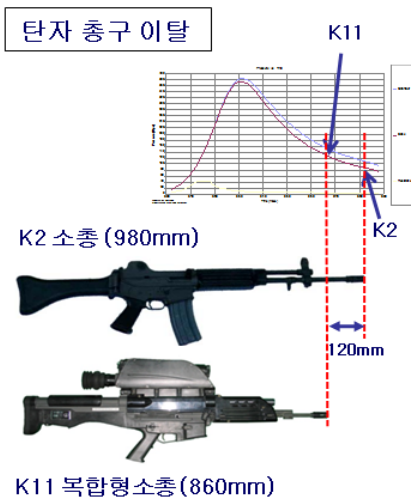


Fig. 2. 총열 단산화 설계에 따른 불완전 연소를 화염 저감형 소염기로 제어

하고, 화염의 발생 원인에 대한 이론적 분석을 수행하였으며, 모델링 및 시뮬레이션(M&S), 역학적 분석 등의 방법을 통해 총구 끝에서의 유동해석을 하여 총구 화염 제거가 가능한 형태의 소염기 특성을 분석하였다.

그리고 총구 전방 화염에 영향을 주는 요소를 설계 요소에 대한 연구를 진행하여 화염 저감형 소염기를 설계/제작하였으며, 기존의 소염기와 비교시험을 실시한 결과를 분석하였다.

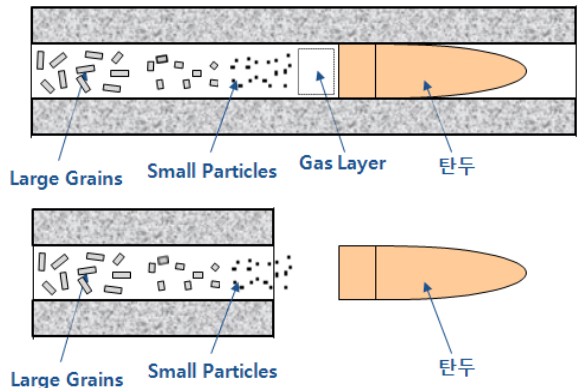


Fig. 3. 추진제의 완전연소(상), 추진제 파티클 불완전연소(하)

3. 이론적 분석

가. 총구화염의 발생원인

총구 전면에서 과도한 화염이 발생하는 것은 총열에서 추진제가 다 연소하지 못하고 나오다가 Mach disk 부근(2차 화염 영역)에서 순간적인 연소가 일어나는 것이 주된 원인으로 알려져 있으며, 2차 화염 영역은 추진제 속도가 Mach No. 이하로 떨어질 때 순간적으로 온도가 상승하여 점화가 되면서 발생하는 것이 주요원인이다^[1].

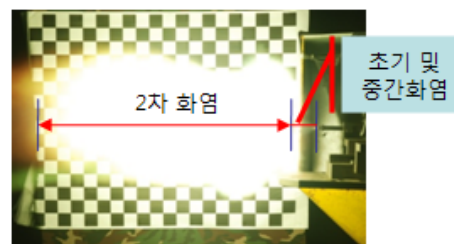


Fig. 4. 총구화염의 분류

통상적으로 화포 발사 모델에서는 Mach disk 부근에서 온도는 1000K 정도이며 Keller의 점화온도 모델에 따르면 소구경화기에 적용하는 추진제류의 임계 점화온도(critical ignition temperature)는 약 1000K~1100K 정도이며, K100탄의 추진제의 임계 점화온도는 1100K 부근이다¹⁾. 추진가스 내에 추진제 파티클이 섞여 나오면서 Fig. 5와 같이 형성된 Mach disk 부근에서 추진가스의 순간적인 온도상승으로 추진제 파티클의 점화온도를 넘어서게 되어 총구 전방으로 화염이 발생한다. 따라서 총구 끝부분의 유동을 원활하게 하여 추진가스의 속도가 Mach No 이하로 떨어지는 거리를 총구로부터 늘이거나, Mach disk 발생에 영향을 주는 요소를 추출하여 Mach disk의 위치를 조절하는 방식의 연구를 통해 총구화염을 줄일 수 있음을 이론적으로 분석해 볼 수 있었다.

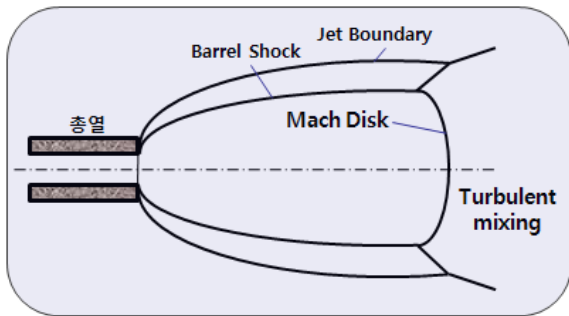


Fig. 5. 총구 끝부분의 유동현상

나. 총구전방 유동해석

개방형과 폐쇄형 소염기의 형상을 결정하기 위해 총구 전방에서 일어나는 유동을 분석하였다. 이러한 유동해석을 위해 유체역학 분석 상용 프로그램(FLUENT)을 이용해 분석을 수행하였으며, 관련 프로그램 분석을 위한 조건을 분석해본 결과 유체의 속도 및 밀도 등의 조건을 분석하였을 때 식 (1), 식 (2)를 이용한 압축성 점성 유동장으로 분석을 수행하였으며 z방향의 벡터함수는 고려하지 않고 x, y 방향의 유동장 해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial x} = \frac{\partial \vec{G}}{\partial x} \quad (1)$$

$$\vec{W} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v_x \\ \rho v_y \\ \rho v_z \\ \rho E \end{pmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{pmatrix} -\rho v \\ \rho v v_x + p \hat{i} \\ \rho v v_y + p \hat{j} \\ \rho v v_z + p \hat{k} \\ \rho v E \end{pmatrix}, \quad \vec{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \\ \tau_{ij} v_{ij} + q \end{pmatrix} \quad (2)$$

\vec{W} : 변수벡터, \vec{F} : 유동벡터, \vec{G} : 점성벡터, \vec{x} : 위치벡터

소염기의 형태(개방형, 폐쇄형)에 따라 총구 전방의 유동장이 어떻게 형성되는지 확인하기 위해 상용 M&S 프로그램을 이용하여 분석하는 과정을 수행하였다. 총열에서 추진가스가 총구 밖으로 분출될 경우에 대해 폐쇄형 소염기의 형태와 개방형 소염기의 형태를 조사하여 상용 M&S tool인 FLUENT 6.0 프로그램을 이용하여 분석을 하였으며, 2차원 형태의 해석을 수행하였다. 현재 국내외적으로 소구경 화기와 관련 분야의 M&S 분석 기법은 3차원적 해석은 이루어진 바가 없으며, 2차원 형태의 분석도 총열 끝에 아무런 형상변형이 없는 상태의 분석만이 이루어져왔다. 그러나 본 연구에서는 폐쇄형 소염기를 중간 슬롯을 내는 방법 등으로 조사하는 형태로 모델링을 수행하여 총구 전방에서 일어나는 압력분포 및 속도 분포를 분석함으로써 총구 끝부분에서의 폐쇄형 소염기가 총구 유동을 어떻게 만들어 내는가를 확인할 수 있었다. 총구 끝의 유동해석 방정식은 식 (3), 식 (4)와 같은 Standard k-e model을 사용하였으며, 이는 레이놀즈수(Re)가 4000을 넘어가는 완전한 난류 영역에 속하며 점성도가 작은 압축성 유체해석에 k-e model이 유효함을 확인하여 관련식을 프로그램에 적용하여 분석을 수행하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (4)$$

$$k = 0.8, \quad \epsilon = 0.8$$

해석결과 Fig. 6에서 보는바와 총구 끝단에 슬롯을 낼 경우 총구 전방의 약 30cm 부근부터 상하 방향의 유동이 크게 퍼지는 것을 확인 할 수 있었으며 총구 전방에서의 속도 감소를 확인하여 Mach disk가 생기는 위치를 확인 할 수 있었다. 시뮬레이션 결과 약 30cm 부근에서 가스의 속도가 Mach No. 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 폐쇄형 소염기를 적용하여 화염발생 위치를 분석하였던 실험결과와의 위치와 거의 유사하였다. M&S 결과를 바탕으로 분석해보았을 때, 본 M&S를 통해 속도를 분석해보는 연구는 실험결과를 입증하는데 일정부분 도움이 되었으며 총열 내에서 추진제가 불완전 연소할 경우 폐쇄형 소염기는 폐쇄형 슬롯이 상하 유동을 만들어내어 화염의 크기를 키울 가능성이 있을 것이라 예상할 수 있었다. 따라서 끝부분의 슬롯을 없애는 개방형 소염기가 전방의 가스 유동에 유리할 것으로 판단되었다.

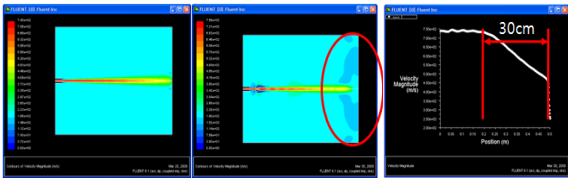


Fig. 6. 총구전방의 속도분포
(좌 : 개방형, 중 : 폐쇄형, 우 : 속도감소)

따라서 이러한 현상을 분석하여 강선 반대 방향으로 가스분출구 중심 위치를 편심시키면, 추진가스가 가스 분출구 측면과의 부딪히는 양이 훨씬 줄어든 상태에서 보다 원활하게 빠져나가게 될 것으로 분석할 수 있었다. 주변 대기로의 원활한 추진가스 배출/확산은 추진 가스의 밀도 및 온도 저하를 야기하고 이로 인해 산소와 반응하여 발생하는 총구 화염의 크기가 줄어들게 되므로, 총구 화염 크기 저감 측면에 있어서는 강선 반대 방향으로 가스 분출구 위치를 편심시키는 것이 더욱 효과적이다.

또한 소염기 내부형상이 동일하게 되어 있을 경우, Fig. 7, 8에서 보는바와 같이 가스분출구 중심 위치를 강선 반대 방향으로 편심시키는 것이 강선 방향으로 편심시키는 것이나 편심이 없는 것보다는 역학적으로 총구 앞 가스유동에 유리하게 되어 총구 화염 저감에 기여한다. 그리고 최대한 편심을 시키는 것이 화염저감에 유리하지만 편심에 따라 소염기 두께가 감소되어 약 150발 정도의 지속사격 시에도 470°C 이상 올라가는 K11 복합형소총의 총열에 적용할 경우 소염기 끝부분이 벌어지게 된다. 실제로 약 3mm 편심된 개방형 소염기를 제작하여 시험을 하였을 때 강도의 심한 저하가 일어나 사용이 어려움을 확인하여 지속사격에 따른 고온에 견디는 소염기의 최대 편심양은 2mm로 편심 설계를 수행하였으며 이 치수로 설계를 할 경우 공기역학적으로도 Fig. 8과 같이 추진가스의 유동방향에 따른 배출이 원활이 이루어지게 된다.

4. 설계적 분석

가. 소염기 편심설계 분석

일반적으로 소구경화기는 탄자의 비행안정성을 보장하기 위해 총열내부에 강선을 가지고 있다. 이러한 강선은 총탄이 밖으로 나올 때 총구 끝부분에 와류를 형성하게 하는 역할을 하는데 이 때 추진가스는 총탄이 회전하는 방향과 동일한 방향으로 회전을 하게 된다.

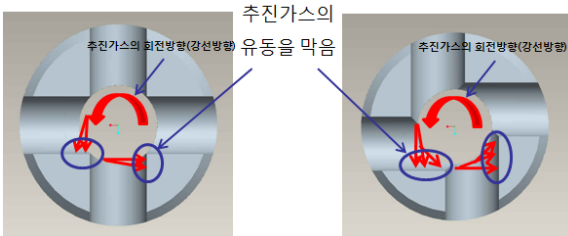


Fig. 7. 가스분출구의 편심위치에 따른 역학적 분석

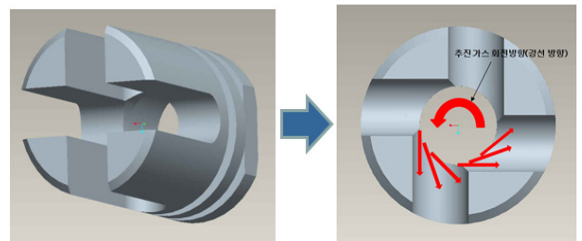


Fig. 8. 일반적 개방형 소염기[#2](좌), 편심형 모델링 결과[#2](우)

나. 소염기 끝 형상에 따른 분석

기본 유체역학의 노즐이론에 따르면 유체가 나가는 노즐의 끝부분 형상(테이퍼)에 따라 Mach disk가 생기는 위치와 시간, 크기가 달라진다. 따라서 이러한 노즐이론을 바탕으로 총구화염에 원인이 되는 Mach disk를 제어할 수 있을 것으로 분석하여 관련 기초연구이론을

소염기 설계에 중요요소로 적용하여 설계를 수행하였다. 지금까지 국내에서는 총열 내에서 완전 연소가 이루어진 탄을 사용하였으므로 총열 끝부분의 테이퍼 설계는 주로 병사의 운용성 향상을 위해 이루어져 왔으며, 화염을 제어하기 위한 테이퍼 설계 연구는 이루어진 바가 없다. 그러나 압축성의 고속 유체흐름에 대한 관련 기초이론을 소염기 설계에 적용하여, 소염기 끝부분의 각도에 따라 Mach disk가 생기는 영역을 조절할 수 있음을 분석할 수 있었다.

일반적인 노즐 분석 이론인 Yousefian 모델에 따르면 노즐 전방에 추진가스가 확장되어 터블런트가 일어나는 경계가 되는 지점을 Normal shock이라고 하면 그 위치는 일반적으로 Mach disk 부근이 된다^[1].

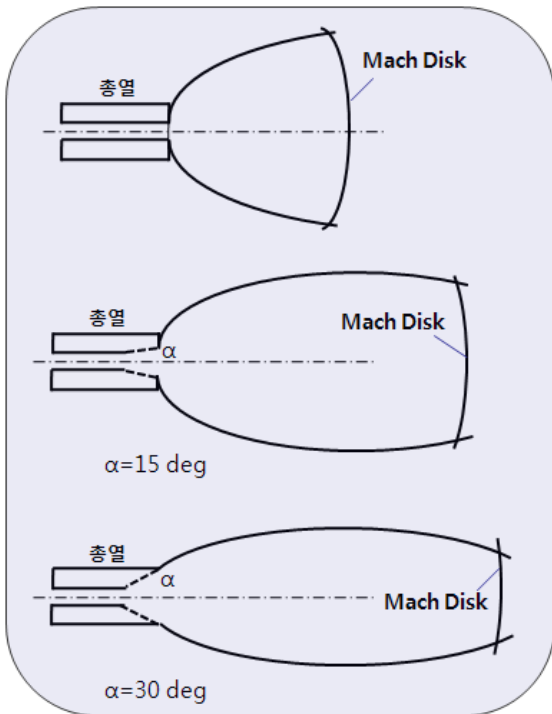


Fig. 9. 총구 끝 각도에 따른 마하디스크 위치와 크기

Normal shock 부근에서는 추진가스가 속도가 떨어지며 터블런트 현상이 일어나게 되는데 이때 추진가스에 섞여있는 추진제 파티클의 점화가 일어나게 되어 화염이 형성되게 된다. 이러한 현상이 생기는 과정중 Fig. 9에서 보는바와 같이 총구 끝부분의 각도가 커짐에 따라 Mach disk가 생기는 위치가 노즐의 끝에서 멀어지며 생기는 크기도 작아지게 된다.

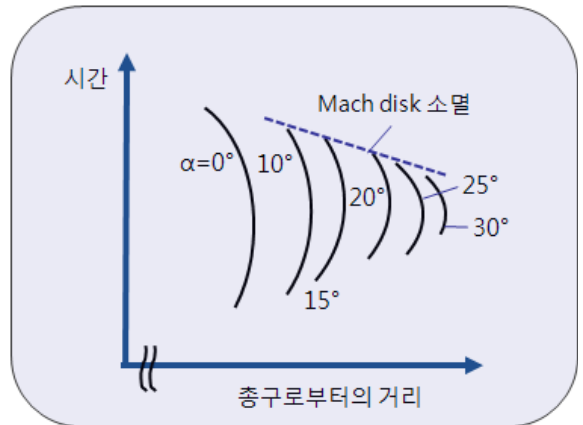


Fig. 10. 총구 끝 각도에 따른 마하디스크의 발생 위치 및 시간

또한 일반적인 노즐실험 이론분석 결과를 바탕으로 한 데이터를 분석한 결과 Fig. 10에서와 같이 총구 끝 각도가 커질수록 Mach disk 현상이 생기는 시간도 줄어들게 되어 화염을 저감시키기 위해서는 총구 끝의 각도를 가능한 크게 설정할 필요가 있다.

따라서 이러한 연구결과를 바탕으로 수정한 모델링 결과에서 소염기의 안쪽 끝 부분에 테이퍼를 줄 경우 Mach disk가 생기는 거리가 멀어지며 생기는 시간도 줄일 수 있을 것으로 예상되었다. 일반적으로 다 연소되지 못한 추진제 파티클은 그 자체질량으로 인해 추진가스보다 더 멀리 나가기 어려워 Mach disk가 총구 전방에서 더 먼 지점에 생길 경우 추진제 파티클이 그 지점까지 도달할 확률을 줄일 수 있게 된다. 따라서 총구 끝 안쪽부분에 가능한 많은 테이퍼를 주는 것이 필요하지만, 총구 끝을 얇게 설계할 경우 운용상 문제가 발생한다. K11 복합형소총은 도수장비이므로 일반적으로 병사가 운용중에 총의 날카로운 부분으로부터 긁힘 현상이 발생하지 말아야 하는데, 화염저감을 위해 끝부분을 얇고 날카롭게 설계할 경우 운용상 문제가 발생하게 된다. 또한 5.56mm 모듈의 경우 약 150발 정도의 지속사격 시 총열의 온도는 약 470℃까지 올라가게 되는데 야전에서는 이정도 수준 이상의 연속사격도 종종 이루어지고 있으며 그로 인해 총구 끝 소염기의 벌어짐 현상에 대한 문제를 제기하고 있는 상태로, 개방형 소염기의 경우 폐쇄형 보다 더 두껍게 설계하지 않을 경우 총열 및 소염기의 내구성에 문제가 발생한다. 따라서 소염기의 부피 및 크기를 고려할 때 운용상 제약이 없으며 강도 유지가 가능한 가

장 큰 테이퍼 설계값으로 테이퍼 설계를 수행하였으며 그에 따른 소염기의 최종 형상 설계 Fig. 11과 같이 수행하였다.

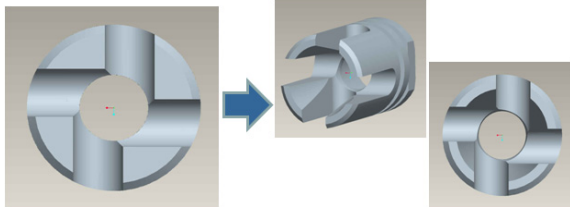


Fig. 11. 편심형 모델링 결과[#3](좌), 최종 모델링 결과 [#4](우)

이렇게 모델링한 결과를 통해 제작한 소염기는 K2 용 소염기와 비교하였을 때의 결과는 Table 1과 같다. 소총의 전장에 대한 설계 요구조건을 만족시키기 위한 총열장의 길이(310mm)에 따른 최대 설계 소염기 길이는 K2와 비교해서 약 9mm 정도 짧으며 무게는 약 30g 경량화 되어 있는 형태로 설계하였다. 소염기의 재질의 경우 티타늄으로 설계할 경우 약 40g 정도로 현재보다도 16g정도 더 경량화가 가능하나 티타늄 가공비용에 따른 비용 상승의 문제로 K2와 동일한 재질로 설계를 수행하였다

Table 1. 소염기 설계결과 비교

내용 \ 구분	K11	K2	비고
총열장(mm)	310	465	155mm 단신화
강선수	185mm	1회전	
재질	Steel	Steel	
소염기 길이(mm)	45	54	9mm 단신화
소염기 무게(g)	56	86	30g 경량화
소염기 형태	개방형	폐쇄형	

5. 실험적 검증

가. 화염시험

소구경화기에서 총구화염시험의 절차는 TOP(Test Operation Procedure) 및 소구경화기 분야에서 일반적으로

로 실험하는 절차로 수행을 하였으며 다음과 같은 방식으로 이루어진다.

먼저 소총을 고정거치대에 거치한 후 Fig. 12에서 보는바와 같이 격자간격이 5cm인 화염 측정자를 제작하여 총열과 평행하게 총구옆에 설치한다. 그리고 카메라라는 발생하는 화염을 전부 촬영할 수 있게 총구의 직각방향에 삼각대를 이용해 위치를 고정한다. 이때 탄피 방출구 쪽에 화염측정자를 설치할 경우 탄피방출덮개를 설치하여 시험중 화염측정자가 손상이 되지 않도록 조치한다. 무월광 상황에서 빛을 모두 제거한 후 카메라를 B셔터(노출)로 고정한 다음 단발 5회 사격 및 점사 3회 사격으로 누적화염을 측정한다.

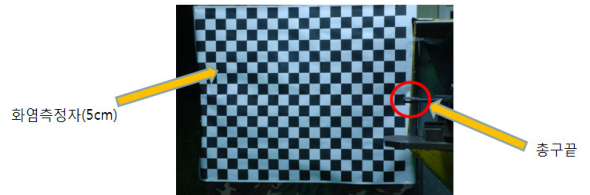


Fig. 12. 총구화염 측정시험

이러한 화염시험 절차로 시험을 수행하여 결과를 분석하였다. 시험결과는 Table 2와 같으며, 먼저 기존의 폐쇄형 소염기를 적용하여 시험한 결과는 Fig. 13에서 보는바와 같이 화염이 과다하게 발생함을 확인할 수 있었다. 그리고 기본적인 개방형 소염기는 K100탄의 단발사격 시에는 화염이 발생하지 않았으나, KM193탄의 사격 시에는 화염이 발생하였고, 편심형 소염기[#3]의 경우 일반적 개방형 소염기[#2]보다는 화염이 생기는 크기 및 비율이 높지는 않았으나, 역시KM193 탄의 사격 시에는 화염이 발생하였다.

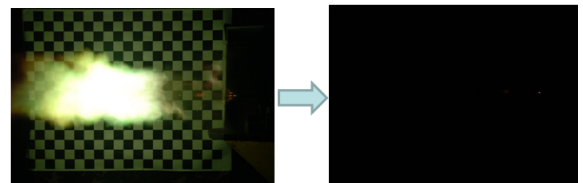


Fig. 13. 화염저감효과 확인
(좌 : #1 소염기, 우 : #4 소염기)

마지막으로 최종 모델링 소염기[#4]의 경우 K100탄 및 KM193탄의 사격에서 모두 화염이 발생하지 않아 최종 설계된 소염기의 화염효과가 가장 뛰어난을 확인

할 수 있었다. 결론적으로 개방형으로 끝부분에 테이퍼를 주며 강선 반대방향으로의 슬롯을 편심시킨 소염기 형태(#4)가 화염저감에 가장 유리하다는 것을 검증 시험을 통해 확인할 수 있었다.

Table 2. 소염기 시험결과 종합

구 분	#1	#2	#3	#4
K100 단발	발생	없음	없음	없음
K100 점사	발생	일부발생	없음	없음
KM193 단발	발생	발생	일부발생	없음
KM193 점사	발생	발생	발생	없음
결 과	화염발생	화염발생	화염발생	화염없음

※ #1 : 기존 소염기, #2 : 일반적 개방형 소염기
 #3 : 편심형 모델링 결과, #4 : 최종 모델링 결과

6. 결 론

본 연구에서는 총열장이 짧은 소총의 경우에 발생하는 큰 총구화염을 저감하기 위해 다양한 형태의 소염기를 설계/제작하였으며, 총구화염 저감효과를 실사격 시험을 통해 분석하였다. 5.56mm 구경의 시험 소총에 대한 시험 결과, 개방형 소염기가 폐쇄형 소염기에 비해 총구화염의 크기가 매우 작았으며, 여러 형태의 개방형 소염기 중에서 가스분출구 위치를 시계방향으로 이동시키고, 소염기 내부에 Cone 형상을 적용한 소염

기가 K100탄 및 M193탄 모두에 대해 소염효과가 우수함을 확인하였다. 본 연구는 소화기의 야전 운용환경에서 사용하기 적합한 형태의 소염기를 연구하여, 실험적으로 검증하였으며 결론은 다음과 같다.

이론적 분석 및 M&S를 통한 단산화된 총열에 적합하며 화염 제거가 가능한 소염기설계기술을 확보하여 객관적 절차의 실험을 통해 화염저감형 소염기 설계기법에 대한 운용성을 검증하였다. 현재 사용군이 K2 소총용으로 사용하는 K100탄, KM193탄을 동일하게 사용하면서도 사격통제장치 열상운용에 제약을 주지 않으며 단산화 경량화가 가능한 형태의 소구경 화기를 개발하는데 중요한 역할을 하는 전장축소형 무화염 소염기는 향후 개발이 예상되는 다양한 형태의 복합형, 단산화되는 소총에 설계 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] Klingenberg, G. and Heimerl, J. M., "Gun Muzzle Blast and Flash", Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 139, AIAA, Washington, pp. 197 ~338, 1992.
- [2] Jang, X. et al., "Numerical Simulation of Blast Flow Fields Induced by a High-Speed Projectile", Shock Waves, Vol. 18, pp. 205~212, 2008.
- [3] Sommers S., "Muzzle Flash Suppressor", US Patent No. 5,596,161, 1997.
- [4] 국방규격 1305-1061-1, "5.56MM 보통탄, K100", 2000.
- [5] 국방규격 1305-1026-2, "5.56MM 보통탄, KM193", 2004.