

40 mm 중구경 화포용 천공형 소음기 설계

이해석^a, 홍준희^{b*}

A Muffler with Ventilation Holes for a 40 mm Medium Caliber Gun

Hae-Suk Lee^a, Jun-Hee Hong^{b*}^a The 8th Research and Development Institute, Agency for Defense Development,
Tae-An P.O.Box 1, Taean-gun, Chungnam-do, 32143, Korea^b Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University,
99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34183, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 26 July 2016
Revised 9 September 2016
Accepted 25 November 2016

Keywords:

Muffler
Impulse noise
Medium caliber gun
Flow characteristics

ABSTRACT

A 40 mm medium caliber gun to be equipped with ventilation holes is designed and manufactured in this study. The muffler used is composed of holes, blades, and several spaces in the tube. Accordingly, a numerical analysis is performed with computational fluid dynamics (CFD) before testing the muffler. The validity of the numerical analysis is examined by analyzing the differences between the measured data of the firing test and the results of the CFD analysis. The CFD analysis showed that the numerical analysis can be used positively in the muffler design because no difference exists between the results of the field test and the CFD analysis. The test result also indicated a noise reduction of approximately 10 dB. Moreover, the muzzle velocity is almost equivalent, regardless of the muffler.

1. 서론

화포를 이용하여 사격 시 발생하는 충격소음은 140 dB 이상의 과도한 수준으로 짧은 지속시간, 저주파특성, 강한 방향성 등으로 운용자에게 치명적인 영향을 미치며, 인근 주거지역에 여러 가지 환경문제를 야기시킬 수 있다.

높은 충격소음을 저감하기 위해 미국의 경우 BRL(ballistic research lab.)에서는 Fransler^[1-3]를 중심으로 1980년대에 소음기에 의한 소음저감 대책 연구가 진행되었으며, 이후 화포 소음을 저감하기 위해 유동장 해석 및 실험 등의 다양한 연구를 수행하였다.

미국의 Pater & Shea^[4]는 실험연구를 통하여 화포의 포구에 제

퇴기, 큰 형태의 포구장치물, 배플 형태의 사일런서, 물분사, 흡음제 등을 사용함으로 해서 포구에서 발생하는 충격소음 레벨을 줄이는 기법을 제안하였다. 최근에는 상당히 큰 소음기가 포구의 반동 시스템 및 기동성 등에 제약을 준다고 판단하여, 포 주변에 차폐 구조물을 만들어 소음을 저감하는 연구를 수행하고 있다^[5]. 국내에서는 소구경 화기를 대상으로 한 실험적 방법을 중심으로 소음기 연구가 일부 시도 되었으며 사격장 밖으로의 소음의 전파를 효과적으로 차단시키기 위한 방음시설에 대한 연구가 수행되었다^[6-9]. 지금까지의 국내의 연구에서는 주로 배플 형태의 사일런서, 물분사 또는 차폐 구조물 등에 대한 연구를 수행해 왔다.

따라서 본 논문에서는 일반적인 배플형 소음기와 다른 천공형 소음기를 설계하여 유동해석 후 실 사격시험을 통해 감음효과를

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5642

Fax: +82-42-822-5642

E-mail address: hongjh@cnu.ac.kr (Jun-Hee Hong).

측정, 분석함으로써 향후 화포용 소음기 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다. 본 논문은 천공형 소음기에 대한 해석, 설계 및 실험논문으로서 전반부에서는 사격시험에 의해 발생하는 충격소음 원리를 고찰하였으며, 중반부에서는 소음기의 전산해석 타당성 검증, 계측방법 등에 대해 기술하였다. 후반부에서는 소음기 유무에 따른 소음저감도 비교 및 포구속도 차이를 분석 하였으며 결론에서는 화포용 소음기개발을 위한 설계방안과 사용가능성 등을 고찰하였다.

2. 이론적 배경 및 소음기 특성

2.1 포구전방 유동특성

포구 전방에서 발생하는 고압의 가스는 포탄의 앞 쪽에 발생하는 선임충격파(precursor shock wave)와 포탄이 포구를 벗어난 후에 형성되는 추진제 충격파(propellant shock wave)의 형태로 발달하며 진행된다^[10]. 선임충격파는 장약폭발 후 포신 내부에서 포탄에 앞서 일차적으로 전진하는 유동이며, 대기 영역에서 급격히 팽창하면서 초기 폭발충격파(blast shock)로 발달된다. 선임충격파가 지나간 후 포탄이 포신 끝을 지나 대기 영역으로 나오게 된다. 이때 포탄에 의해 포신 내부에 압축되어 있던 유동이 급격한 팽창을 하는데, 이 유동이 추진제 충격파로 발달하게 된다.

2.2 소음레벨

인간의 귀는 저음에서 고음까지 아주 넓은 범위의 음을 들을 수 있으며 청각감도는 1,000-6,000 Hz가 가장 예민하다. 음의 세기 레벨은 기준량 10^{-12} W/m^2 와의 비의 대수형태이고 임의의 음의 세기를 표현하는 방법이다. 음압레벨은 공기 중에서의 음에너지를 가장 쉽게 측정할 수 있는 것이 음압이다. 일반적으로 음의 세기 10^{-12} W/m^2 에 대응되는 음압은 $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ 가 된다. 이 값을 기준음압 P_0 라 하고 음의 세기레벨을 음압으로 환산하면 식 (1)이 된다^[11].

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} [dB] \quad (1)$$

이것을 음압레벨(sound pressure level)이라고 하고, 그 단위는 데시벨(dB)을 사용한다. 소음레벨은 음압레벨의 변형으로서 기본적으로는 레벨과 같은 것이지만, 인간의 청각특성에 가까워지도록 주파수 특성을 보정한다.

2.3 천공용 소음기의 구조 및 특징

본 연구에서 사용된 소음기는 발사체가 이동하는 구간에 천공과 날개를 설치하여 사격 시 발생하는 높은 고압가스를 분산시켜 가스

압을 줄일 수 있는 방식이다. 즉 40 mm 탄자가 중공 원형관 통과 시 관외부에 뚫려 있는 천공을 통해 소음 저감이 이루어지며 천공에서 빠져나간 소음은 챔버에서 일정 시간 머문 후 외부로 빠져나가거나 소멸하게 되어 많은 소음이 저감되도록 설계되어졌다. Fig. 1은 천공형 소음기의 내부구조 형상을 나타낸 것이다.

3. 전산해석 및 타당성 검증

3.1 전산해석 방법 및 경계조건

천공형 소음기 해석을 위하여 상용 코드인 Fluent가 사용되었으며, ICEM-CFD를 이용하여 소음기 내, 외부에 걸쳐 사각 형태의 격자를 생성하였다. 총 해석시간은 0.02초까지, 시간 간격은 2.0×10^{-6} 초 단위, 축대칭(axisymmetry) 조건으로 해석을 수행하였으며, 수렴조건으로 1.0×10^{-3} 의 잔차값을 설정하였다.

초기조건으로 설정한 포구압은 7,611 kPa로 포구 앞에 센서를 설치하여 계측한 결과이며, 포구에서의 온도는 관련문헌을 참조하여 2,500°C로 설정하였다^[12]. 소음기 해석결과의 효과적인 분석을 위하여 Fig. 2에 표시된 점에서 구한 압력 데이터를 비교, 분석하였다. 여기서 사격방향(firing direction)은 화포의 포구로부터 탄자가 이탈하는 방향이며 45도, 90도, 135도 방향의 1, 2, 3, 4 m 구간은 압력값을 획득한 지점이다.

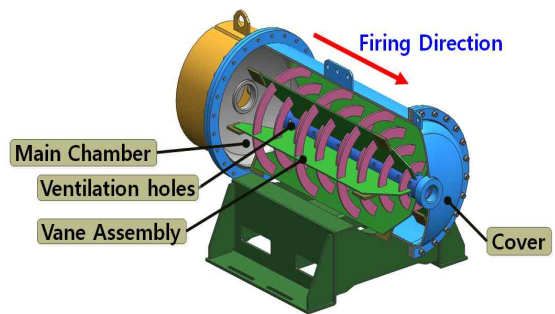


Fig. 1 The internal structure of muffler with ventilation holes for 40 mm gun

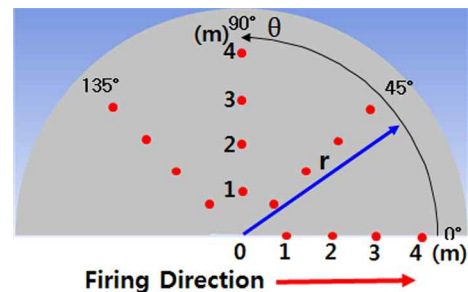


Fig. 2 The displacement of sensing points located against firing direction

3.2 전산해석의 타당성 검증

전산해석의 타당성을 검증하기 위해, 소음기를 적용하지 않은 화포에 대해 관련문헌^[13]으로부터 얻은 유동장과 본 연구에서 사용된 해석방법으로 구한 유동장을 비교하였다. 또한 40 mm 화포에 대한 실험데이터와 수치해석 결과를 직접 비교하여 데이터의 신뢰도를 검증하였다.

Fig. 3은 7.62 mm NATO G3 라이플의 추진제 가스 유동장(propellant gas flow)에 대한 실험결과와 수치해석 결과를 비교한 것이다. 이를 통해, 실제 유동장에서 관찰할 수 있는 물리적 현상이 이번 연구를 통해 얻은 수치해석 결과에도 유사하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 소음기를 부착하지 않은 40 mm 화포에 대하여 포구를 중심으로 4 m 지점에서의 최대 압력 실험값과 수치해석값을 나타낸 것이다. 수치해석과 실험값을 비교한 결과 압력분포의 경향이 일치하고 있으며, 그 값 역시 오차범위 10% 이내로 일치함을 알 수 있다. 상기의 결과를 통하여 화포소음기 유동해석에 사용될 수치해석 모델이 정성적, 정량적으로 타당함을 확인하였다.

3.3 천공형 소음기 해석결과

Fig. 5는 천공형 소음기를 화포에 부착하였을 때, 발생하는 압력 분포를 나타낸 그림이다. 입구조건이 부과된 후 약 5.0×10^{-4} 초에 압축된 파형이 포구를 이탈하기 시작하여 버섯머리 형태의 파형을

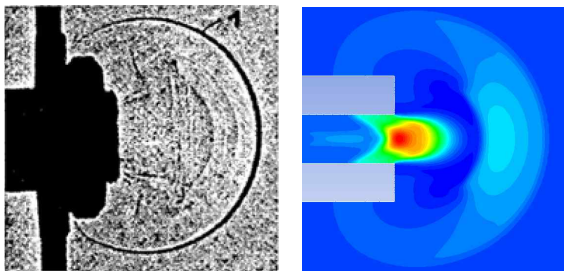


Fig. 3 Real (left) and numerically obtained (right) propellant gas flow fields of a 7.62 mm caliber NATO rifle G3

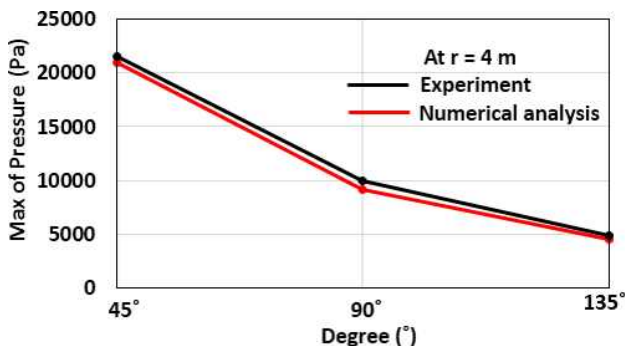
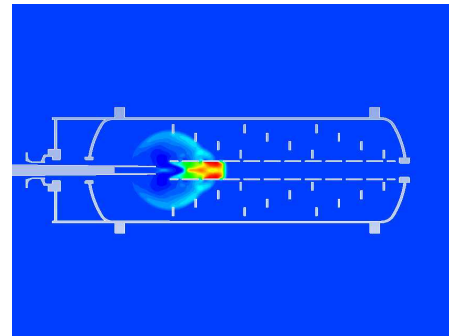


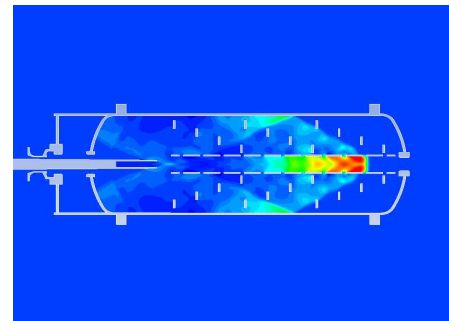
Fig. 4 Comparison of pressure data obtained by experiment and numerical analysis

형성하고 있다.

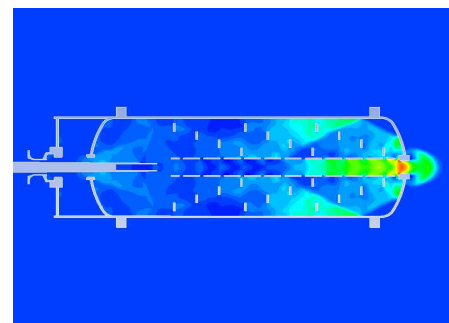
형성된 압축파는 내부에 설치된 천공을 따라서 압축파의 원형을 유지하면서 소음기를 벗어난 후 소음기 출구를 중심으로 원형으로 대기로 전파되고, 일부는 천공을 통해 소음기 내부 공간으로 확산된다.



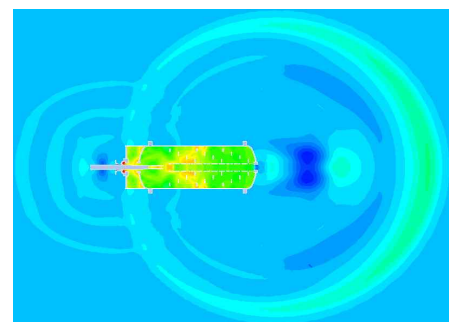
(a) 5.0×10^{-4} sec



(b) 1.3×10^{-3} sec



(c) 1.7×10^{-3} sec



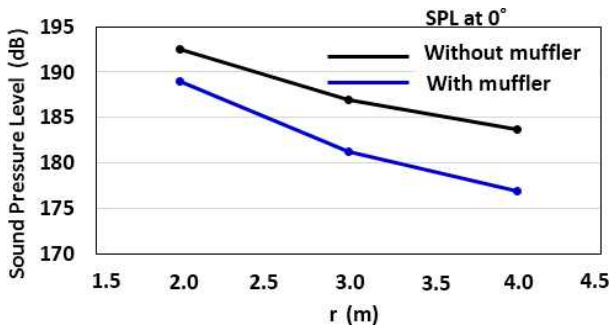
(d) 7.0×10^{-3} sec

Fig. 5 A fluid fields through the muffler after shooting from the 40 mm gun

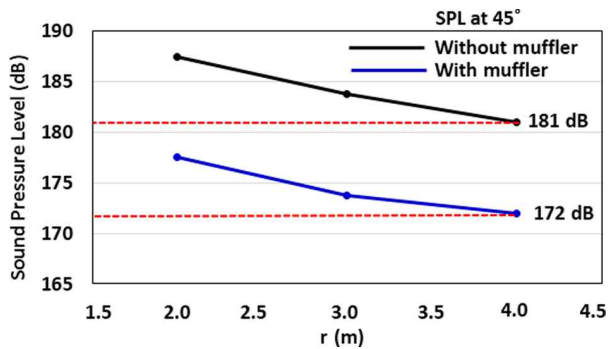
3.4 천공형 소음기 소음저감 특성

Fig. 6에서는 $r=2\text{ m}$ 지점부터 음압을 나타낸 것으로 소음기가 없는 경우와 비교했을 때, 소음기가 있는 경우 음압감소 효과가 뚜렷하게 보임을 확인할 수 있다. 여기서 $r=2\text{ m}$ 지점부터 음압을 나타낸 이유는 소음기 장착 전, 후 음압에 대한 비교를 동일한 위치에서 확인하기 위해서이다. 즉, 소음기를 통과한 음압을 이용하여 비교하기 위해서이다.

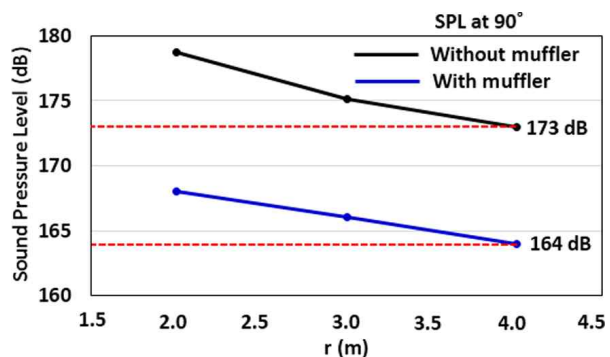
식 (2)와 같이 음압감소율을 계산하였을 때, Fig. 6에 표시한 지점에 대하여 천공형 소음기는 평균 62%의 음압감소율을 보였다. 이는 포구에서 토출된 충격파가 소음기 내부의 공간으로 팽창하고 대부분이 소음기내부에서 일정기간 머문 후 소음기 외부로 전달되어, 압력이 충분히 줄어드는 것으로 판단된다.



(a) Comparison with pressure values at $\theta = 0^\circ$



(b) Comparison with pressure values at $\theta = 45^\circ$



(c) Comparison with pressure values at $\theta = 90^\circ$

Fig. 6 The comparison with values of shock noise obtained from 3 cases; with muffler and without muffler

Noise Reduction (%)

$$= \frac{\text{without Muffler} - \text{with Muffler}}{\text{without Muffler}} \times 100 \quad (2)$$

이때, without muffler는 소음기를 적용하지 않은 경우이며, with muffler는 소음기를 적용한 경우의 음압을 의미한다.

4. 소음계측 및 구조해석

4.1 소음계측 및 구조해석

소음 신호 획득장치는 DEWE-5000을 이용하였다. 자료 처리 소프트웨어는 Dewesoft 6.6.7을 사용하였으며 소음계측 센서는 Fig. 7과 같이 포구를 기준으로 반경 4 m, 8 m, 12 m, 20 m 지점과 200 m 떨어진 구간에 설치하여 소음기 장착 전, 후의 소음저감 효과를 확인하였다^[14,15].

소음기에 대한 구조해석을 통해 살펴보고자 하는 것은 소음기가 화포에서 발생하는 압력으로 손상이 일어날 가능성이 있는지 여부이다. 그러므로 시간에 따른 소음기 내부응력 결과를 분석하여 재료의 기준강도를 넘어서는 경우가 생기는 지에 대한 검토가 요구된다. 해석 시 경계조건으로 하부면은 바닥에 고정된 조건을 부과하였으며, 중심단면은 대칭방향으로 변형이 발생하지 않도록 조건을 부과하였다. 또한, 챔버 내부의 압력은 유동해석에서 압력을 각 챔버 내부에 부과하여 압력 경계조건을 설정하였다. Fig. 8은 천공형 소음기의 단면도로서 구조해석 결과 중 변형량을 나타낸 것이며 Fig. 9는 천공형 소음기에 40 mm 중구경 화포가 실제 인입된 모습을 나타낸 것이다.

변형량은 소음기 출구부분의 격판에서 약 0.17 mm의 최대 변형이 발생됨을 알 수 있었다. Table 1은 구조해석을 위한 격자의 특

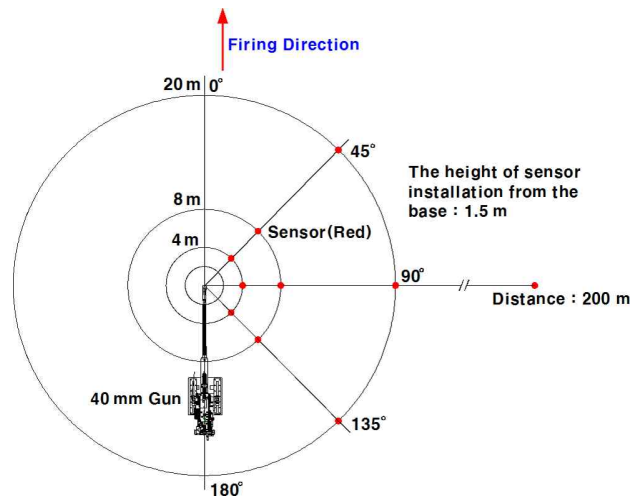


Fig. 7 Installation of measuring sensors to acquire signals of sound pressure at the site

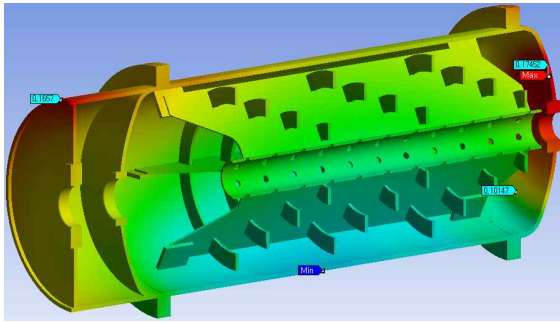


Fig. 8 A deformation contour of structure analysis of the muffer with ventilation holes



Fig. 9 The installation of muffer to 40 mm medium caliber gun during the fire

Table 1 Mesh properties for the muffer

Mesh type	Tetra & Hexa
Curvature normal angle (°)	10
Min. size (mm)	0.4
Max. size (mm)	50
Max. face size (mm)	30
No. of nodes	590,355
No. of Elements	241,656

성을 나타낸 것이다. 구조해석 결과에 따른 응력과 안전율 분포를 검토해 본 결과 최대 응력은 소음기와 지지대가 접촉되는 부위에서 약 68 MPa의 응력이 발생하여 소재의 항복강도(325 MPa)보다 낮은 응력값이 분포하고 있기 때문에 안전성은 충분히 확보된 것으로 판단된다. 안전율 분포는 챔버에서 최소 약 4.7 이상의 안전율을 가지고 있는 것으로 계산되었다.

5. 실 사격 시험결과

5.1 소음기 유무에 따른 소음저감

Fig. 10은 중구경 화포용 소음기 유무에 따른 시험결과로서 소음저감을 나타낸 그래프이다. 계측값은 음압 측정위치에서 4 m, 8 m, 12 m, 이격된 45도, 90도, 135도에서 측정된 음압값과 포

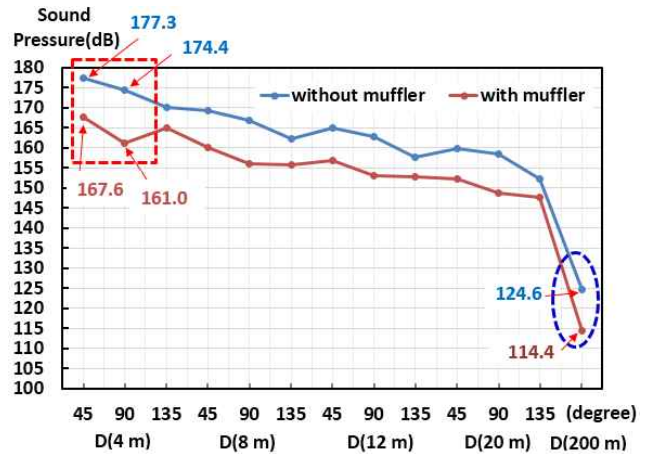


Fig. 10 The comparison of noise reduction with muffer and without muffer

Table 2 The comparative values of shock noise at 45° and 90° of 4 m distance from the 40 mm gun

Variable		Without muffer (test)	With muffer (test)
		Without muffer (CFD)	With muffer (CFD)
Location (4 m)	Degree (°)	177.3	167.6
		181.0	172.0
Degree (°)	90	174.4	161.0
		173.0	164.0

구를 기준으로 측 방향으로 200 m 이격된 지점이다. 검토 결과 음압감소는 천공형 소음기를 적용했을 때 약 10 dB 정도 감소된 것을 확인할 수 있다. 사격시험 간 소음기 내부 및 외부에 흡음재 적용이 안 된 상태였으며 만약 흡음재가 적용된다면 더 높은 음압이 감소될 것으로 판단된다. Table 2는 Fig. 6에서 포구로부터 4 m 이격된 45도, 90도 지점에서의 소음예측값과 Fig. 10의 포구로부터 4 m 이격된 45도, 90도 지점에서의 실험값을 상호 비교한 것으로 예측값과 실험값이 어느 정도 일치함을 확인할 수 있다.

5.2 소음기 내부압력 측정

사격시험 전 화포용 소음기에 대해 구조해석을 실시하여 안전성이 확보되었음을 확인하였으며 실 사격시험을 통하여 소음기 내부 압력을 측정하여 구조안전성을 검토하였다. 압력측정을 위해 Fig. 11과 같이 소음기 외부에 압력센서 3개를 설치하여 10발에 대한 평균압력 측정결과로 1번 센서에서는 0.80 MPa, 2번 센서에서는 0.50 MPa, 3번 센서에서는 0.59 MPa이 계속되었다. 소음기 내부에 발생하는 최대 압력값이 구조해석 시 지지대 접촉부에 발생하는 압력과 비교해 보았을 때 적게 발생됨을 보이는데 이는

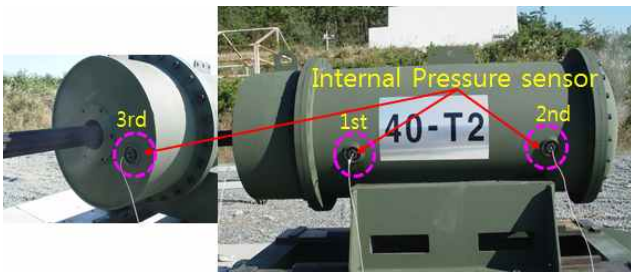


Fig. 11 The figure of muffler which is installed with internal pressure measurement sensors

실제 소음기 내부에서의 압력이 짧은 시간 내에 포구 후방으로 누출됨에 따라 적게 발생하는 것으로 판단된다.

5.3 포구속도 결과분석

소음기 장착 유무에 따른 포구속도 차이 검증을 위해 통계적 가설이 이용되어졌다. 통계적 가설이란 대상 모집단에서 정의되는 하나 이상의 확률변수의 분포에 대한 주장이나 추측을 말하며 대부분의 가설검정 문제에 있어서는 실질적으로 두 종류의 통계적 가설들이 설정된다¹⁶⁾.

식 (3)과 같이 하나는 실제로 검정대상이 되는 가설로 귀무가설이라 불리우고 이를 통상 H_0 로 표기하며, 또 다른 하나는 통상 H_1 로 표기되는 대립가설이다. 이러한 두 종류의 가설설정엔 어떤 한 가설이 참이면, 다른 가설은 거짓이라는 것을 암시하고 있다. 검정 절차를 통해 귀무가설 H_0 가 기각(혹은 채택)되어야 한다면 이는 대립가설 H_1 이 채택(혹은 기각)되어야 한다는 것을 의미한다. 대상이 되는 두 모집단의 각 분포는 $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 과 $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 를 따르고 두 모분산들 σ_1^2, σ_2^2 은 알고 있다. 이 두 정규 모집단들로부터 각각 크기가 n_1 과 n_2 이고 독립인 두 확률표본들의 각 표본 평균을 \bar{x}_1, \bar{x}_2 라고 하면 각 가설에 대한 검정통계량 z_0 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad H_1 : \mu_1 > \mu_2 \tag{3}$$

$$\text{Rejection region } Z \geq z_{0.05} \quad (Z_\alpha = 1.645)$$

Test statistic

$$z_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} = \frac{968.1 - 966.7}{\sqrt{\frac{2.23^2}{10} + \frac{2.17^2}{10}}} = 1.42 \tag{4}$$

$z_0 > z_{0.05}$ 가 성립되므로 유의수준 5%에서 귀무가설을 기각할 수 없으므로 포구속도값은 소음기 장착 전과 후에 동일하다고 볼 수 있다. Table 3은 가설검정에 사용된 소음기 장착유무에 따른 포구속도의 결과값을 비교한 것이다.

Table 3 A comparison of muzzle velocity with muffler and without muffler

No.	With muffler (m/s)	Without muffler (m/s)
1	968.2	970.5
2	962.0	966.1
3	966.2	966.7
4	967.9	967.9
5	966.0	964.6
6	964.1	971.4
7	966.9	965.4
8	966.9	968.5
9	968.4	968.8
10	970.0	970.8
Average	966.7	968.1
S.D.	2.17	2.23

6. 결 론

40 mm 중구경 화포용 천공형 소음기에 대한 설계/실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 40 mm 중구경 화포에 적용할 수 있는 천공형 소음기를 설계하여 소음기 적용 전, 후 유동장과 압력 분포를 수치해석적으로 규명하였다. 이를 통해 향후 신규 화포용 소음기 개발을 위한 하나의 설계도구로써 신뢰성 있게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

둘째, 소음기를 적용하지 않았을 때에 비하여 소음기 적용 시 현저한 음압감소 효과를 얻을 수 있었으며 평균적으로 약 10 dB의 소음 감소율을 보였다.

셋째, 소음기 장착유무에 따라 포구속도에 차이를 보이지 않으므로 각종 시험평가 수행 시 소음기 사용이 가능할 것으로 판단된다.

넷째, 본 논문에서 제시된 소음기는 탄두가 이동하는 구간에 천공과 천공 외부에 결합된 날개와 몸통에 의해 소음이 저감되므로 기존 격막만으로 이루어진 소음기에 비해 소음기 외부로 소음을 토출하는 시간이 길어지므로 소음기의 성능측면에서 우수하다고 판단된다.

References

- [1] Kevin, S. F., Raymond, V. W., 1991, A Muffler Design for Tank Cannon Acceptance Testing, Memorandum Report BRL-MR-3931, 1-10.
- [2] Gustave, K. H., 1998, Evaluation of an Add-on Muzzle Exhaust Flow

- Manipulator for Noise Suppression on Large Caliber Guns, ADA196-601, 1-5.
- [3] Kevin, S. F., David, H. L., 1986, Attenuation of Muzzle Blast using Configurable Mufflers, Technical Report BRL-TR-2979, 1-16.
- [4] Larry, L. P., John, W. S., 1981, Techniques for Reducing Gun Blast Noise Levels : An Experimental Study, NSWC TR 81-120, 1-12.
- [5] Larry, P., Anthony, K., 1998, Development of a Muffler for Small Arms Range Noise Mitigation, USACERL Technical Report 98/126, 1-12.
- [6] Kang, K. J., Ko, S. H., Kwak, Y. K., Lee, D. J., Lee, I. C., 2007, An Evaluation of Silencer Characteristics by Live Firing Test, *Journal of the KIMST*, 10:3 217-224.
- [7] Park, M. S., Ku, T. W., Kang, B. S., 2003, Performance Evaluation for Noise Suppression of a Silencer in Small Arms, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 20:9 151-159.
- [8] Jeong, A. Y., Kim, J. S., 2011, A analysis of Acoustic Characteristics and Shooting Noise Prediction for Shooting Range shielding in Military, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 24:11 833-839.
- [9] Kim, J. W., 1999, An Experimental Study of Manufacture and Effectiveness of Noise Reduction of Silencer Adapted to K-2, A Thesis for a Master, A Graduate School of Soldier Science, Republic of Korea.
- [10] Rehman, H., Hwang, S. H., Fajar, B., Chung, H., Jeong, H., 2011, Analysis and Attenuation of Impulsive Sound Pressure in Large Caliber Weapon during Muzzle Blast, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25:10 2601-2606.
- [11] Cha, I. W., 1994, *Noise and Vibration Engineering*, Mun Woon Dang, Seoul.
- [12] Jung, B. S., 1981, *A Handbook of Weapon Engineering*, Agency for Defence Development (AMDC-1-81-0001), Seoul.
- [13] Klingenberg, G., Heimerl, J. M., 1992, *Gun Muzzle Blast and Flash*, The Progress in Astronautics and Aeronautics Series, 139 13-18.
- [14] US Army Test and Evaluation Command Test Operations Procedures, 1981, *Sound Level Measurement*, TOP 1-2-608, Maryland.
- [15] Arnold, P. G., 1984, *Handbook of Noise Measurement*, GenRad, Massachusetts.
- [16] Korean Standard Association, 2003, *Quality Management*, Korean Standard Association, Seoul.