

소형 화기용 소음기의 소음 저감 성능 평가

박문선*, 구태완**, 강범수#

Performance Evaluation for Noise Suppression of a Silencer in Small Arms

Moon-Sun Park*, Tae-Wan Ku** and Beom-Soo Kang#

ABSTRACT

The impulse noise of bullet after shooting in small arms has an effect on the hearing ability of human. Although a silencer has been developed for noise reduction in small arms, there is only a few researches about relationships between the sound pressure level and the auditory sense of human. In this study, the quantitative sound pressure levels are revealed by experimental measurements of impulse noise with each silencer type. And the performance evaluation for noise suppression of a silencer in small arms is carried out to reduce a serious loss of the hearing ability of the small arms user. It is concluded that the evaluated results can be utilized for checking sound pressure and data accumulation for new small arms design with silencer.

Key Words : Impulse noise(충격소음), Noise suppression(소음 저감), Silencer(소음기), Small arms(소형 화기)

1. 서론

현대에 있어서 소형 화기(Small Arms)는 군사적 목적과 민간 치안 유지의 목적으로 지속적인 발전과 개발이 이루어지고 있으며 이와 병행하여 이들 소형 화기의 사용자들로부터는 운용 측면에서의 인간공학적 요소의 반영 요구가 두드러지고 있다.^{1,2}

군사적 환경에서 소음문제에 관심을 갖게 된 것은 비교적 최근의 일이다. 물론 1차 세계대전 중에 총포 발사음이나 폭발음이 청력손실의 원인이 되고 있다는 사실은 인지하게 되었으나 이 문제를 해결하려는 노력은 구체화되지 않았다. 산업혁명 이후 많은 기계류의 발명이 인간 생활환경을 소음으로

오염시켜 왔지만 이를 방지하기 위한 노력이 이루어지지 않은 것도 사실이다.^{3,4,5} 이러한 무관심은 우선 그 당시의 소음이 현재와 같이 광범위하고 강력하게 나타나지 않은 이유도 있지만 소음도와 인간 청각의 관계를 정확히 측정하여 평가할 수 있는 도구가 존재하지 않았기 때문이다.

1차 세계대전 이후 화약 폭발음이 청각손실에 미치는 영향에 대한 수많은 의학적 논문이 발표되었으나 이들 연구는 계속 큰 관심을 모으지 못했고, 2차 세계대전 중 과도한 소음이 전투력 상실의 원인이 된다는 사실이 알려짐으로써 이 분야의 연구는 활기를 띠게 되었으며 소음도와 청력손실에 관한 중요한 기본원리들이 밝혀지게 되었다. 이러

* 접수일: 2002년 11월 1일; 게재승인일: 2003년 7월 11일

** 대우정밀(주) 기술연구소

부산대학교 항공우주공학과

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과

E-mail: bskang@pusan.ac.kr, Tel: (051) 510-2310

한 분위기는 전후에도 연장되어 인간 생활환경의 질적 개선을 바탕으로 산업체에도 파급되었으며 항공기, 자동차 및 기계류에 대한 소음저감 및 방지를 위한 노력이 지속되었다. 따라서 dB 단위를 기본으로 인간의 감각 특성을 고려한 폰(Phone), 존(Sone) 및 노이(Noy) 등의 새로운 소음 평가를 위한 단위가 만들어지게 되었다.^{6,7,8} 이러한 추가적인 소음단위들은 140dB 이상에서 발생하는 영구적 청력 손실(Threshold Shift)뿐 아니라 일시적 청력손실이 영구적 청력손실에 미치는 영향을 정량화하게 되었다.

소음을 평가하려는 시도는 최초 청력손실을 일으키는 소음의 한계치를 평가하고 제한하기 위한 노력이었다. 따라서 소음의 크기감각 즉 시끄러움도(Loudness)의 평가에 초점을 두었다. 그러나 인간 문명의 발전과 더불어 다양한 소음이 발생하게 되고 이러한 소음이 작업능률을 저해하거나 대화를 방해하게 됨에 따라 소음도(Sound Pressure Level)를 고려한 소음평가 방법을 고려하게 되었다. 더욱이 최근에는 소음의 영향이 수면방해, 순환계 질병의 원인이 되고 있음이 밝혀짐에 따라 소음이 인간에 미치는 영향평가는 불쾌감(Annoyance) 까지를 포함하게 되었다. 따라서 소음평가는 소음원의 특성과 평가목적에 따라 다양한 방법이 제시되고 있다.⁹

화기발사소음과 같은 충격소음은 정상소음과는 그 특성이 매우 다르며 기준 설정이 매우 어렵다. 고려해야 할 변수는 최대 음압레벨, 충격음 주기(Duration Time) 및 잔류 소음(Ring) 등이다. 난청에 미치는 충격소음의 영향은 최대음압은 높지만 노출 시간이 짧기 때문에 에너지 측면에서 정상소음보다 적은 것이 당연하다.

본 연구에서는 소화기 운용시 발생하는 충격소음에 대한 평가 및 소화기에 소음기를 부착하였을 때의 성능을 평가하여 소음기의 유형별 충격 소음을 정량화하고자 하였다. 또한 소음기의 감음 특성을 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 탄자 비행중의 발생소음

탄자는 비행중에도 소음을 발생시킨다. 초음속으로 진행하는 탄자는 크래킹에 의해 매우 큰 소음을 발생시키며 아음속탄은 그보다 소음레벨은 적지만 탄자로부터 상당히 먼 거리에서도 인지되는 수

준의 소음을 발생시킨다. 여기서는 아음속탄에 의해 발생되는 탄자비행 중의 소음에 대하여 고려한다.

탄자가 날아오는 방향에 위치한 수음자는 탄자가 접근해 옴에 따라 점차로 커지다가 탄자가 지나가면서 점차로 감소하는 탄자비행에서 발생하는 소음을 느끼게 된다. 이 소음은 명백히 어떤 주기성을 가지고 있음을 알 수 있으며, 소음의 주파수는 탄자의 속도 및 지름과 관계되고 있다.

비행 중의 탄자로부터 발생하는 소음의 발생 메카니즘은 Fig. 1에 제시되어 있다. 탄자가 이동함에 따라 탄자 배면에 난류 경계면(Turbulent Boundary Layer)이 발생하게 된다. 이것은 주변 공기와 탄자 배면의 공기의 동압차에 의한 와류(Vortex)의 발생을 유도하게 되며, 와류의 회전속도가 가속화됨에 따라 와류의 크기는 점차로 증가하게 되며 이 과정은 동압차가 발생하지 않는 탄자로부터 먼 거리로 이탈될 때까지 유지된다.^{10,11,12}



Fig. 1 Noise mechanism of bullet after shooting

탄자의 비행속도로부터 전파되는 구형 와류의 에너지는 식 (1)과 같다.

$$E_v = \frac{5\pi}{28} d^3 \rho_0 V^2 \quad (1)$$

여기서 d 는 탄자의 지름, ρ_0 는 공기 밀도, V 는 탄자속도를 의미한다.

한 개의 와류를 생성하기 위해 탄자로부터 소모되는 에너지 E_b 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$E_b = (C_d \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_0 V^2}{2}) \frac{V}{f} \quad (2)$$

여기서 f 는 와류의 생성 및 소멸 주파수, C_d 는 항력계수(Drag Coefficient)이다.¹³ 식 (1)과 (2)로부터 탄자비행 중에 발생하는 소음의 발생주파수 f 는 식 (3)과 같다.

$$f = \left(\frac{7C_d}{10} \right) \frac{V}{d} \quad (3)$$

$$\left(\frac{dQ}{dt} \right) = \left(\frac{P_t}{P_0} \right)^{1/\gamma} A_t u_t \quad (8)$$

탄자와 같은 방향으로 이동하는 와류의 생성 및 소멸에 의한 소음은 원음장에서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$p = \frac{1}{4\pi r} \left(\frac{d^2 m}{dt^2} \right) \quad (4)$$

여기서 r 은 탄자에서 수음점까지의 거리이며, $d^2 m/dt^2$ 은 공기유동의 시간에 따른 변화량을 의미한다. 음압 p 가 조화함수의 형태를 가지므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = p_m \sin 2\pi f t \quad (5)$$

여기서 p_m 은 최대음압이다.

2.2 총구 추진가스 팽창에 의한 소음

총구에서의 추진가스 팽창은 Schlieren Test 등으로 통해 가시화 하면 원음장에서는 구형의 형상을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 원음장에서는 총구를 점음원으로 가정하고 구형으로 확산되어지는 모델로 가정한다. 이 경우 원음장에서의 음압은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$p = \frac{\rho_0}{4\pi r} \left(\frac{d^2 Q}{dt^2} \right) \quad (6)$$

여기서 Q 는 추진가스에 의해 점유된 주변 공기의 부피를 의미한다. 식 (6)을 적분하면 식 (7)이 된다.

$$\int p dt = \frac{\rho_0}{4\pi r} \left(\frac{dQ}{dt} \right) \quad (7)$$

여기서 dQ/dt 는 구형의 추진제 부피가 증가함에 따라 발생하는 확산률을 의미하게 된다.

이 확산률은 분출되는 가스량과 이 가스가 공기 중에서 어떻게 팽창해 나가는가에 따라 결정된다. 팽창과정은 등엔트로피 과정과 매우 유사하기 때문에 확산률은 대기압하에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

여기서 P_t 는 총구에서 분출되는 가스압이며, P_0 는 대기압을 의미한다. γ 는 기체상수로써 추진제의 경우 1.25를 적용할 수 있다. A_t 와 u_t 는 총구 단면적과 총구에서의 가스속도를 의미하며 총구에서의 가스속도는 탄자속도와 같다고 볼 수 있다.

Figure 2는 탄자가 총구를 빠져 나오는 순간의 가스유동 현상을 형상화 한 것이다. 분출되는 가스 질량 변화는 식 (9)가 된다.

$$\frac{dm}{dt} = \rho_t V_t A_t \quad (9)$$

초기에는 탄자가 가스진로를 방해하고 있지만 탄자와 총구사이의 거리 e 가 구경 d 의 1/4 이상이 되면 탄자의 영향은 없는 것으로 가정할 수 있으며 $e > d/4$ 가 될 때까지 소요시간은 전체 가스방출 시간의 1% 수준이므로 무시할 수 있다.

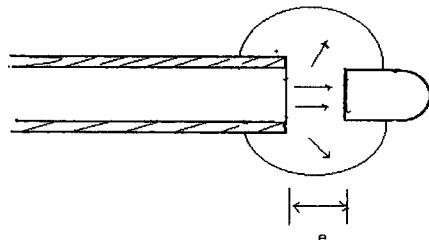


Fig. 2 Emission of trust gas from small amrs outlet

원음장에서의 음압수준은 대기압의 수천 혹은 수만분의 1 수준으로 매우 작은 값이다. 즉 원음장에서 음파가 전달되는 입장에서 볼 경우에는 가스 이동속도는 정지상태에서 진동하는 것으로 볼 수 있는 수준이다. 음파의 발생은 이러한 가스팽창에 의한 압력변동에 의해 주변의 공기가 압축되면서 이동하는 것이며 압력변동은 공기의 유동을 수반하게 된다.

근음장과 원음장의 경계가 될 수 있는 위치에서 등엔트로피 과정이 유지되고 있다면 유변공기와의 압력차 ΔP 는 식 (10)이 되며, 이 압력차가 구형으

로 일정하게 확산된다면 식 (11)과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P = P_0 \left[\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] \approx \gamma P_0 M \quad (10)$$

$$p = \Delta P \frac{x}{r} \quad (11)$$

여기서 x 는 음원에 근접한 임의의 위치이며, p 는 위치 r 에서의 음압을 의미한다.

2.3 소음기 장착시의 소음 특성

소음기 내부에서의 가스 팽창이 충분히 이루어 진 경우 소음기 외부로 분출되는 시점에서의 가스 압력은 식 (12)로 나타난다.

$$P_2 = P_0 \left[\frac{\left(\frac{P_t}{P_0} \right)^{1/\gamma} + \frac{V_2}{V_1}}{1 + \frac{V_2}{V_1}} \right]^{\gamma} \quad (12)$$

여기서 P_0 는 대기압, P_t 은 총구에서 빠져나와 소음기로 들어가는 순간의 가스압력이다. 또한 소음기 출구에서의 온도 T_2 는 식 (13)이 되며, 이것은 소음기 장착에 의해 최종적으로 대기 중에 확산되는 가스의 압력과 온도를 강하를 보여 주고 있다.

$$T_2 = T_t \left[\frac{\left(\frac{P_t}{P_0} \right) + \left(\frac{V_2}{V_1} \right)}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right) \left(\frac{P_t}{P_0} \right)^{1/\gamma}} \right]^{\gamma-1} \quad (13)$$

속크튜브(Shock Tube)와 같이 총강 내의 고온, 고압가스가 순간적으로 분출되는 모델에 대해서 최대 음압을 나타내는 관계식은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$p_m = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{4\gamma-1}} \frac{\gamma P_0 d}{8kr} \left(\frac{T_2}{T_0} \right) \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{5-3\gamma}{4\gamma}} \quad (14)$$

여기서 T_e 는 P_e 는 가스가 대기로 빠져 나오는 순간 온도와 압력 값으로 소음기가 없는 경우 T_t , P_t 로 소음기가 있는 경우 T_2 , P_2 로 표현되고 있

다. 소음기 장착에 의해 발생하는 소음감소비(Noise Reduction)는 식 (15)와 같은 관계식으로 나타난다.

$$NR = \left(\frac{T_t}{T_2} \right) \left(\frac{P_t}{P_2} \right)^{\frac{5-3\gamma}{4\gamma}} \quad (15)$$

소음기는 총구외부에 연장되어 장착되어 있으며 탄자가 안정화되기 이전이므로 소음기를 통과하여 이동중에 소음기 안내벽과 충돌하여 탄자운동이 불안정해 질 경우가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 일반적으로 소음기의 구경은 화기의 구경보다 크게 설계한다. 따라서 탄자가 총구를 빠져 나온 후에는 넓어진 소음기 구멍과 탄자사이로 가스가 빠져나갈 수 있다.

3. 소음기 장착시 사격음 측정 시험

3.1 소음기 설계

Figure 3은 총구에 일반적인 소음기가 장착된 것을 정형화한 것이다. V_1 의 부피를 갖는 총열에서 탄자가 빠져 나오는 순간에는 약 300기압에 1000°C에 가까운 고온, 고압의 추진가스가 함께 빠져 나오게 된다. 이것이 대기로 직접 확산되는 경우에 대해서는 앞 절에서 제시한 바와 같으며 소음기가 장착되어 있는 경우에는 1차로 소음기 내부에서 가스가 팽창하여 가스압력 및 온도가 충분히 낮아진 다음에 대기로 분출된다. 일반적으로 소음기 내부의 부피 V_2 는 V_1 의 약 20배의 크기를 갖게 되며 소음기로부터 분출되는 가스는 약 3~4 기압의 압력과 150°C 미만의 온도를 갖도록 설계되어진다. 따라서 소음기 설계는 탄자가 매우 빠른 속도로 소음기를 통과하여 대기로 빠져 나오는 매우 짧은 순간에 소음기 내부에서 가스를 충분히 팽창시켜 압력과 온도를 최대로 낮추는 구조를 결정하는 것이 주요 고려사항이다.

3.2 사격음 시험 방법

소음기를 장착한 상태에서의 소화기의 사격음을 측정하기 위해 사격은 소화기 각 1정당 5발씩 단발 사격을 하여 소음도를 측정하였다. 소음 측정 지점은 사수 위치에서 우측으로 1.5m 이격된 위치에서 측정하며, 소음계는 지상 1.5m 위치에 삼각대를 이용하여 설치하였다. 또한 사격음에 대한 시간

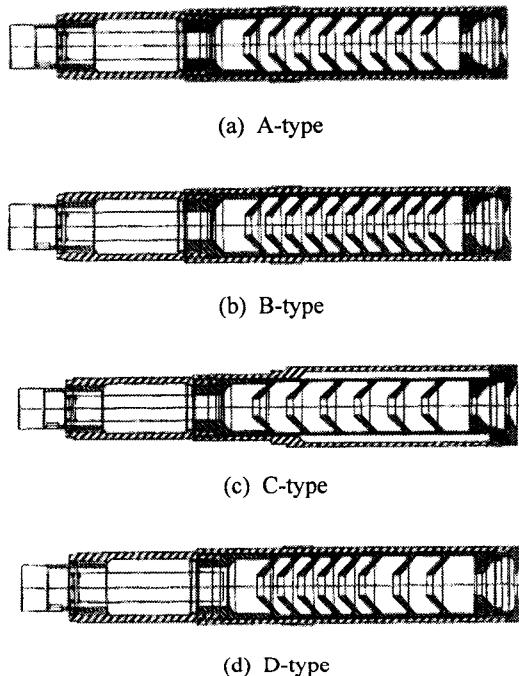


Fig. 3 Designed Shape of silencer for small amrs

반응치(Time Weight)는 충격(Impluse)로 설정하여 오름시간을 35msec, 내림시간을 1sec으로 설정하였다.

측정 주파수의 보정은 일반 환경소음에 대한 'A' 가중치 보정법을 이용하여 선형으로 보정하였으며, 현장에서는 소음레벨의 최대값을 측정·기록하고 분석을 위한 시간영역에서의 측정된 소음치는 테이프 레코더(Tape Recorder)에 녹음하여 데이터를 디지털화하여 분석하였다.

3.3 사격음 측정 시험 결과

Table 1은 사격측정에 따른 최대음압을 나타내는 표로써 소음기 없이 측정한 것과 소음기를 장착 시켜 측정한 결과들을 보이고 있다. 또한 각각의 소음기 형태에 대해 5발씩 사격하여 측정이 이루어졌다. Table 1에서 소음기 유형 1번 N/A는 소음기를 장착하지 않았을 때의 시험 결과이다.

Fig. 4는 소음기를 장착하지 않은 경우의 시간의 변화에 따른 음압 레벨을 나타낸 그림이다.

Table 1 Maximum noise level for shooting(unit:dB)

Silencer type \ Number of shooting	1	2	3	4	5
1	N/A	152.1	150.9	152.5	152.3
2	A	-	126.3	123.9	125.0
3	B	126.6	122.9	122.1	122.7
4	C	125.5	125.0	125.1	126.3
5	D	125.0	123.2	121.2	124.7

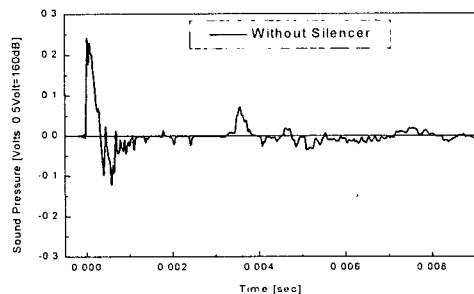


Fig. 4 Noise pressure distribution for time increment without silencer

Fig. 5는 소음기를 장착한 경우에 있어서의 시간의 변화에 따른 음압 레벨을 나타낸 그림들이다. Fig. 5(a)부터 Fig. 5(d)까지는 A, B, C, D 유형의 소음기 형태에 따른 음압 레벨을 보여주고 있다.

Fig. 4의 소음기를 부착하지 않은 경우는 단순히 추진가스의 팽창에 의해 음압 레벨이 저주파로 높게 나타나고 있지만, 소음기를 부착한 Fig. 5(a)부터 Fig. 5(d)까지는 배플(baffle)의 저항으로 인해 가스가 차단되어 고주파로 전환되면서 최대 음압 레벨은 소음기를 부착하지 않은 경우에 비해 훨씬 낮게 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 고주파의 잔상이 계속되는 시간이 증가할수록 감음효과가 우수하다고 볼 수 있다.

이 그림들을 통해 알 수 있는 것은 먼저 Fig. 4의 소음기가 없는 경우는 저주파로 사격 바로 직후 약 500 μ sec에서 상당히 높은 약 0.25volts (80dB)를 나타내고 있다는 것이다. 그러나 소음기를 장착한 Fig. 5는 소음기를 장착하지 않은 Fig. 4에 비해 고

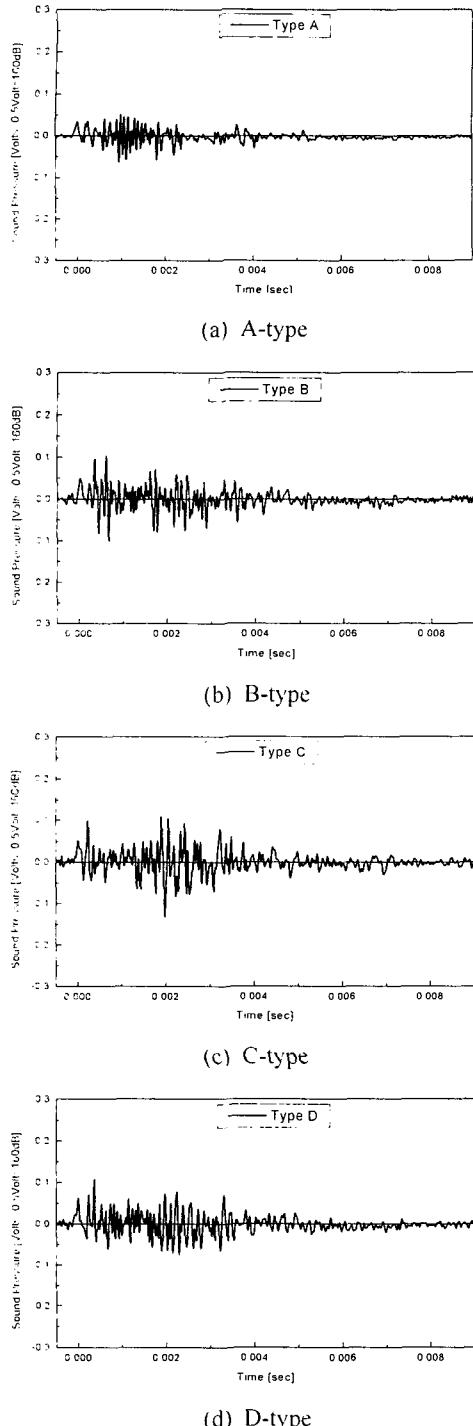


Fig. 5 Noise pressure distribution for time increment with silencer

주파형태로 전환되었음을 알 수 있고 특히 free cursor 부분, 즉 사격후 바로 가스가 새어 나오기 시작하는 것으로 인하여 약간 음압 레벨이 솟아오르는 경향을 보이고 있다. 일반적으로 소음기 구경이 소형 화기의 총구 구경보다는 크기 때문에 소음기를 장착한 경우가 가스가 새어나오는 틈새가 넓어지며, 이 가스가 새어나오는 시간이 길수록 소음차단효과는 크다고 인지된다. 따라서 소음기의 다양한 형태에 따른 소음저감효과는 항상 어떤 시간대의 영역에서 어떤 형태가 반드시 좋다고 단정하기는 쉽지 않으나 Fig. 5(a)와 Fig. 5(d)의 즉 Type B와 Type D의 소음기가 비교적 양호한 것으로 판단되었다.

Figure 6은 소음기를 장착하지 않은 경우와 소음기를 장착한 Type A, B, C, D에 대해 진동수(frequency)영역에 따른 음압 레벨을 보여주는 그림들이다. 소음기가 없는 경우, 저주파부분에서 약 153dB의 최고 음압을 나타내 보이고 있음을 알 수 있다. Figure 6(a)의 Type A의 소음기와 Fig. 6(d)의 Type D의 소음기를 장착한 경우는 저주파에서 최고치가 120dB 약간 넓은 수치이고 그 외의 주파수 영역에 있어서도 120dB 이하가 됨을 알 수 있다. 물론 Fig. 6(d)의 Type D는 약 15kHz 부근에서 120dB를 약간 상회하지만, 12kHz 부근이상은 실제로 사람이 인지할 수 있는 주파수 대역은 아니므로 큰 문제가 되지 않는다고 사료된다. 이외의 다른 모델들은 저주파에서의 최고 음압 레벨값은 Type D나 Type A보다 높기 때문에 전체적인 관점에서 볼 때는 이들보다 우수하지 못한 것으로 판단된다.

이상의 시간영역과 주파수 영역에서 살펴본 소음기 형태에 따른 소음저감효과는 Type D와 Type A의 소음기가 비교적 큰 것으로 사료된다.

4. 결론

비행중의 탄자운동에 의한 소음저감효과에 대한 이론 및 시험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 일반적 소음 이론에 대한 해석과 더불어 소음기를 장착하지 않은 경우와 소음기를 장착한 경우에 대한 이론적 해석방법을 제시하였다.
- (2) 이론을 토대로 할 때, 소총내의 압력주기 Δt 가 클수록 최대음압 p_m 이 증가된다. 즉 가스가 대기중으로 천천히 방출될수록 최대음압은

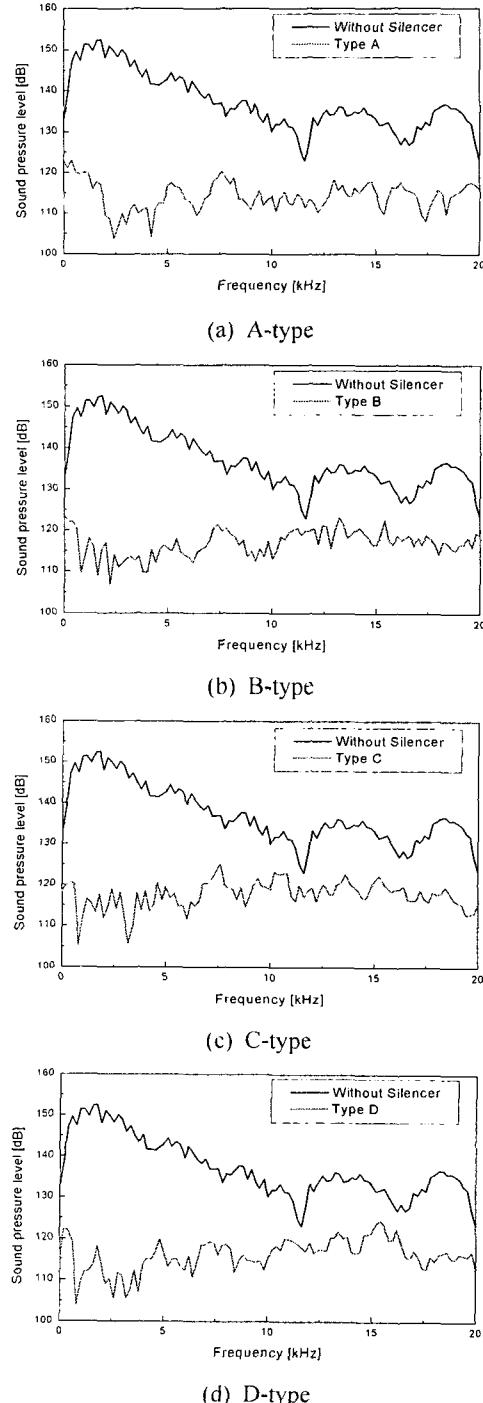


Fig. 6 Noise pressure distribution for frequency range

감소하게 된다. 따라서 소음기의 성능을 향상 시키기 위해서는 가스가 탄자방출 이전부터 조금씩 새어나가고, 탄자가 완전히 빠져나온 이후에도 가스방출이 충분한 시간을 두고 빠져나오도록 하는 것이 바람직하다.

- (3) 소음기를 장착하지 않은 경우와 장착시킨 4 가지 형태의 소음기에 대한 시험결과, 소음기가 없는 경우의 최대음압벨은 저주파에서 순수히 가스팽창에 의해 기인됨을 알 수 있었고, 소음기 장착의 경우는 배풀에 의한 확산효과(Diffusion Effect)에 의해 고주파로 전화되고 소음레벨은 약 30dB 내외의 감음특성을 나타내었다.

이상과 같이 본 연구에서는 소형 화기용 소음기 설계를 위한 기준 자료 측정 및 소음 저감 성능 평가를 통해 소형 화기에서 발생하는 충격 소음을 감소시키기 위한 소음기의 개발 기준을 제시하고자 하였으며, 향후 차세대 소음기 개발에 좋은 기초 자료가 될 것이라 사료된다.

참고문헌

1. AMSTE-RP-702-102(TOP 3-2-826), Kinematic Tests of Small Arms, 1972.
2. Park, M. S., Um, H., Ku, T. W., and Kang, B. S., "Establishment of the System for Checking Peak Recoil Force in a Pistol," J. of the KSPE, Vol. 16, No. 1, pp. 87-94, 1999.
3. US ARMY TEST AND EVALUATION COMMAND : MIL-STD-1474D
4. Jeon, S. T., Noise and Vibration Data Book, Dong-wha Technology, 1992.
5. Cheung, W. S., and Kim, Y. T., "New Approaches to Assessing the Effects of Environmental Noise and Vibration on Human," Proceedings on KSNVE, Vol. 1, pp. 768-771, 2000.
6. Kim, Y. T., Jho, M. J., Lee, Y. B., and Suh, J. G., "Development and Performance of Automated Calibration System of Sound Level Meters," J. of KSNVE, Vol. 8, No. 5, pp. 879-886, 1998.
7. Lee, H. J., Rifle and Ballistics, CheongMoonkag, 1998.

8. Norton, M. P., Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, Cambridge, 1990.
9. Frankford Arsenal Report R-1896, Aug. 1986.
10. White, R. G., and Walker J. G., Noise and Vibration, Halsted Press, 1983.
11. Jang, J. H., Jung, B. G., and An, S. H., "A Study of the Method for Reducing a Drag Coefficient of a Projectile," Proceedings on KIMST, Vol. 2, pp.60-69, 2000.
12. Floers, J., How to make Disposable Silencers a Complete Guide, Silencers Patterns and Principles, 1985.
13. Anderson, J. D., Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill Inc., 1991.