

< 논문 >

전차포 소음 저감을 위한 배플형 소음기의 수치해석

고성호[†] · 이동수* · 강국정**

(2006년 8월 4일 접수, 2007년 1월 9일 심사완료)

A Numerical Analysis of the Baffled Silencer for the Noise Diminution of Tank Gun

Sung-Ho Ko, Dong-Su Lee and Kuk-Jeong Kang

Key Words: Unsteady Compressible Flow(비정상 압축성 유동), Silencer(소음기), Blast Noise(폭발 소음), Muzzle Brake Force(제퇴력), Baffle(격벽), Chimera Grid(겹침 격자)

Abstract

A numerical analysis for a silencer with three baffles of 120mm tank gun has been performed. The Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations with Baldwin-Lomax turbulence model were employed to compute unsteady, compressible flow inside the tank gun and the silencer. An axisymmetric computational domain was constructed by using 12 multi block chimera grids. The resolution of flow field is observed by depicting calculated pressure and muzzle brake force. The peak blast pressure and noise through the silencer reduced approximately 99% and 41dB in comparison to the tank gun without the silencer at near filed.

1. 서 론

전차포 사격 시 그 사격장 인근에 최대 140dB, 평균 100dB의 폭발 소음이 발생한다. 이는 비행장의 평균 소음인 90dB와 일시적인 청력 손실이 발생하는 110dB와 비교했을 때 매우 큰 소음임을 알 수 있다. 이러한 소음은 인근 주민들에게 육체적, 정신적 스트레스 및 환경 파괴와 같은 피해를 주고 있으며, 이로 인해 담양 육군 전차포 사격장의 경우 계속적인 민원이 제기되고 있는 실정이다. 따라서 사격 시 발생하는 폭발 소음의 저감 방안을 마련할 필요성이 있다.

전차포 사격 시 발생하는 충격소음은 포구의 에너지 방사율에 의해 결정된다. 소음기 내부의 배플은 폭발 가스의 진행을 방해하여 유동을 소음기 내부에 유지시켜 대기로 방출되는 에너지의 감소를 유도한다. 그리고 소음기 내부에서 팽창된 폭발 가스는 열전달을 통해 에너지를 소산하게 된다. 이로 인해 압력 파의 지속이 연장되고, 최대 압력이 감소하게 되어 소음 저감의 효과가 발생하게 된다.⁽¹⁾

폭발 유동장의 실험은 비용, 장소 등의 문제로 인해 현실적으로 한계가 있다. 하지만 최근 초고성능 컴퓨터의 등장으로 인해 CFD를 통한 전산 해석 수행이 가능해져 실험과 병행한 소음 감소를 위한 연구가 진행되고 있다.⁽²⁻⁹⁾

본 연구는 전차포 사격 시 발생하는 고온, 고압의 포신 내에 충만해 있는 가스를 초기 조건으로 하여 비정상상태의 전산유체 해석을 수행하였다. 그리고 사격 시 포탄에 의해 형성되는 선임 충격파에 비해 포탄 뒤쪽의 추진 충격파가 매우

[†] 책임저자, 회원, 충남대학교 기계설계공학과
BK21메카사업단

E-mail : sunghoko@cnu.ac.kr

TEL : (042)821-6650 FAX : (042)821-8894

* 충남대학교 대학원 기계설계공학과 BK21메카사업단

** 국방과학연구소 연구원

큰 소음을 유발함에 따라 해석의 용이를 위해 포탄을 배제하였다. 본 연구의 목적은 이러한 폭발 충격파의 유동 해석을 통해 효율적인 배플형 소음기를 설계하여, 근거리 및 원거리 유동장에서 최대한 소음을 감소시키는 데 있다.

2. 지배방정식 및 전산해석 방법

2.1 지배방정식

전차포의 고온, 고압 폭발 유동장을 해석하기 위해 지배방정식으로 3차원, 비정상, 압축성, 그리고 난류에 대한 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 그리고 이 식을 일반 곡면 좌표계로 변환 시 다음과 같다.

$$\partial_t \hat{Q} + \partial_\xi \hat{E} + \partial_\eta \hat{F} + \partial_\zeta \hat{G} = \partial_\xi \hat{M} + \partial_\eta \hat{N} + \partial_\zeta \hat{P} \quad (1)$$

식 (1)에서 좌편의 첫 번째 벡터 \hat{Q} 는 보존되는 종속변수이고, 나머지 세 벡터들은 대류항이며, 우편의 세 벡터는 점성항이다.⁽¹¹⁾

2.2 전산해석 방법

폭발 유동장의 해석을 위해 대류항은 3차 정확도를 가지는 Roe의 풍상차분법⁽¹²⁾으로 이산화하였고, 시간 적분으로는 LU-SGS의 내재적인 방법,⁽¹³⁾ 그리고 Baldwin-Lomax 난류모델을 사용하였다. 또한 격침 격자 기법⁽¹⁴⁾을 이용하여 격자를 구성하였다. 본 연구는 저압 충격파관에 대해 해석한 참고문헌을 통해⁽¹⁰⁾ 이미 타당성을 검증하였다.

Fig. 1은 3개의 배플이 적용된 소음기 해석에 사용된 계산 영역이다. 본 논문에서 쓰이는 모든 길이는 전차포 지름 120mm(D)로 무차원화되었다. 소음기 출구는 X=0 지점이고 포구는 X=-20.25 지점으로 설정하였다. 그리고 소음기 내부의 배플은 각각 -12.875, -8.5, -4.375 지점에 위치시켰다. 또한 폭발 유동장의 압력을 고려하여 가장 높은 압력을 받는 첫 번째 배플은 0.625의 두께로 설정하고, 상대적으로 낮은 압력이 작용하는 2개의 배플은 0.375의 두께로 설계하였다.

본 해석에 사용된 포신 내의 초기 조건은 대기 상태의 압력 및 밀도 그리고 온도로 무차원화되었다. 초기 압력은 852.94, 밀도는 131.55, 그리고 온도는 6.5로 설정하였다. 또한 포신 내의 비열비는 1.3, 충격파의 속도는 5.29를 주었다. 이와 같

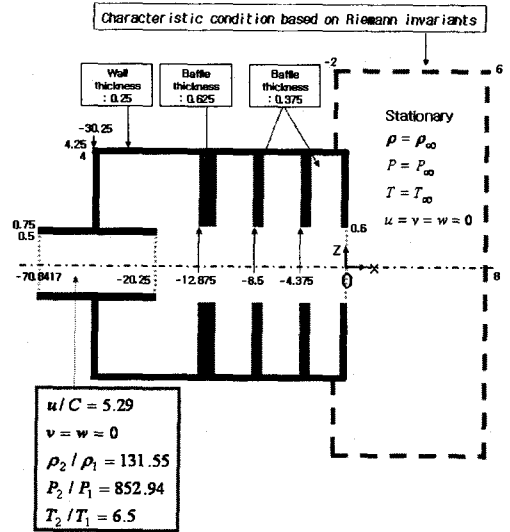


Fig. 1 Computational domain for the silencer with three baffles

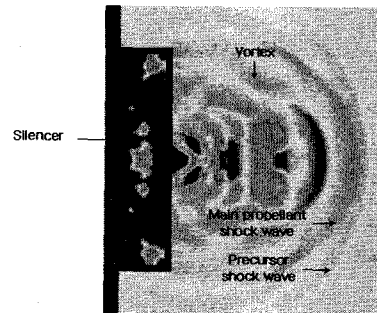


Fig. 2 Blast wave formation in the field near the exit of the silencer

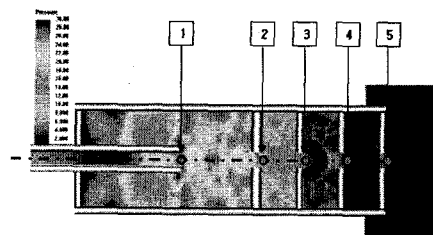


Fig. 3 Calculated data acquisition points in the silencer

은 포신 내부의 초기 조건은 포신을 일체의 형상으로 가정한 lumped method에 근거하여 포신 내부의 압력 변화를 계산한 예측결과를 토대로 설

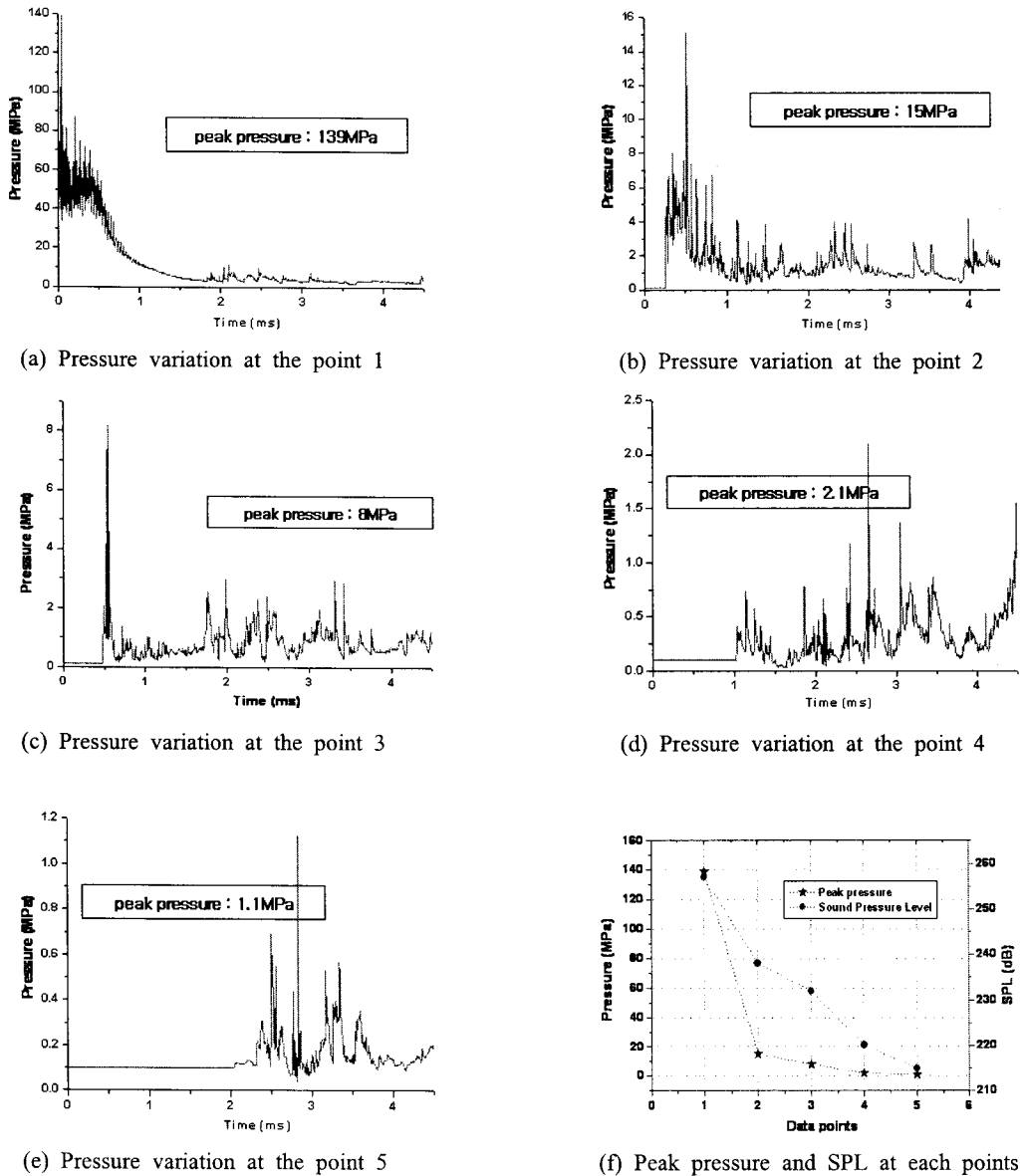


Fig. 4 Calculated pressure variations at the points along the axis of the silencer

정하였다. 그리고 경계조건은 모든 벽면을 비점성 단열로 설정하였고, 유출 및 유입 조건으로는 Riemann invariant에 근거한 특성 조건을 사용하였다. 그리고 총 12개의 멀티 블록과 약 150만 개의 격자를 사용하여 해석하였으며, 슈퍼컴퓨터 NEC-SX 5를 사용하여 85,000 스텝을 해석하는데 약 100시간이 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배플형 소음기의 폭발 충격파 구조

Fig. 2는 배플형 소음기를 지난 폭발 유동의 충격파 구조이다. 소음기를 지난 유동은 순간적인 과대 팽창에 의해 충격파가 발생하게 된다. 소음기를 우선적으로 빠져나온 가스에 의해 선입 충

격파(precursor shock wave)가 유도되고, 이후 주 유동이 빠져나옴에 따라 최대 압력이 발생하는 추진 충격파(main propellant shock wave)가 발생하게 되며, 추진 충격파는 빠르게 선임 충격파를 따라잡게 된다. 그리고 폭발 유동이 소음기 내부의 배플에 의해 반사되어 그 사이를 왕복함에 따라 소음기를 지난 유동에 의해 발생한 충격파는 계속적으로 반복하는 구조를 갖게 된다.

3.2 배플형 소음기의 내부 유동 특성 해석

전산해석의 이점을 살려 실험으로 수행하기 힘든 소음기 내부의 중앙 지점을 선택하여 계산하였다. Fig. 3의 1번 지점은 포구 끝 지점, 2, 3, 4번 지점은 배플 뒤 쪽 지점이며, 그리고 5번 지점은 소음기를 지난 대기영역 지점이다. 1번 지점에서 발생한 압력이 각 배플을 통과함에 따라 감소되는 결과를 비교하여 소음기의 효율을 계산하였다.

Fig. 4의 (a) ~ (e)는 각 지점에서 해석된 압력 변화 및 최대 압력값이다. 그래프의 x축은 ms인 시간이며 y축은 압력이다. 먼저 (a)는 포구 끝인 1번 지점의 해석 결과이다. 폭발 충격파의 최대 압력 및 영향이 발생하는 지점임에 따라 큰 진동이 나타나고 있다. 그리고 약 2ms 이후에는 포신 내부의 유동이 일정하게 방출되는 결과를 보여주고 있다. 최대 139MPa의 압력이 계산되었다. (b)는 폭발 유동의 가장 큰 영향을 받는 첫 번째 배플 이후의 2번 지점이다. 압력의 변화가 큰 진동을 나타내고 있으나 최대 압력이 15MPa이 계산되어 1번 지점에 비해 상당히 큰 압력 감소가 이루어진 것을 알 수 있다. 그리고 (c), (d), 그리고 (e)는 각각 3, 4, 5번 지점을 계산한 결과로 최대 8MPa, 2.1MPa, 그리고 1.1MPa의 압력이 해석되었다. 따라서 압력이 배플을 지남에 따라 점차적으로 감소한다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4의 (f)는 각 지점의 최대 압력과 이를 소음강도레벨인 SPL로 전환하여 배플의 효과를 이해하기 쉽게 나타낸 그림이다. x축은 해석된 각 지점을 나타내며, 좌측 y축은 최대 압력, 그리고 우측 y축은 변환된 SPL값을 나타낸다. 1번 지점에서 그래프가 가장 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 최대 압력의 경우 139MPa에서 1.12MPa로 98.4%의 압력이 감소하였으며, 이를 SPL로 전환한 값은 257dB에서 215dB로 42dB 감소하였다.

3.3 소음기 내벽에 작용하는 접선 응력

소음기의 형상 설계를 위해 소음기 내벽에 작용하는 접선 응력을 계산하였다. Fig. 5는 계산이 수행된 소음기 내부의 측벽을 나타낸다. 폭발 유동은 가장 큰 영향을 받는 첫 번째 배플이 포함된 영역에서 최대 압력을 발생시키며, 팽창된 유동은 모서리 부분에 집중되어 최대 접선응력이 작용하게 된다. Fig. 6의 (a) ~ (d)까지 해석된 각 그래프의 x축은 전차포 지름으로 무차원화된 소음기의 길이이며, y축은 접선 응력 값이다.

Fig. 6의 (a)는 첫 번째 배플 이전의 측벽에 대한 접선응력의 변화 그래프이다. 0.32ms에서 146MPa, 0.97ms에서 50MPa의 최대 응력이 발생하고 있다. 그리고 첫 번째와 두 번째 배플 사이의 측벽인 (b)는 0.74ms에서 7.3MPa, 0.91ms에서 3.6MPa의 최대 응력이 계산되고 있으며, (a)에 비해 작용하는 응력이 크게 감소한 것을 알 수 있다. (c)는 두 번째 배플과 세 번째 배플 사이의 측벽으로 2.48ms에서 0.97MPa, 2.58ms에서 1.3MPa의 최대 응력이 발생하고 있으며, 마지막 측벽인 (d)는 2.33ms에서 0.13MPa, 2.73ms에서 0.16MPa의 최대 응력이 계산되었다.

폭발 유동이 배플을 지남에 따라 소음기 내부의 측벽에 작용하는 응력이 감소하였다. 특히 첫 번째 배플 전후로 매우 큰 응력의 감소를 볼 수 있다. 그리고 (a)와 달리 (b), (c), (d)의 경우 그래프의 진동이 확연하게 보이고 있는데, 이는 유동이 좁은 배플 사이에서 계속적으로 반사함에 따라 나타나는 현상이다.

그림 (a)에 나타난 최대 응력을 토대로 소음기 중량을 설계하였다. 설계에 적용된 재료는 105mm 전차포 재질인 항복응력 1027MPa, 밀도 7.85g/cm³인 MIL-S-46119로써 20%의 안전율을 적용하여 계산하였다. 그 결과 소음기 벽면 두께는 9.6cm, 총 중량은 11,863kg이 계산되었다. 하지만 최대 압력 분포 지역에 재료를 보강하거나, 강도에 비해 밀도가 크게 낮은 고가의 재료를 사용하면 중량은 크게 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 현재 선진국에서도 전차포와 같은 고온 고압에 대한 소음기는 이 형상보다 더욱 큰 구조물 형식을 사용하고 있다.

결국 소음기의 효율을 증대시키기 위해서는 소음기 내부에서 에너지가 충분히 소산될 수 있는 체적이 확보되어야 하나, 이것은 필연적으로 소

음기의 중량을 증가시키게 된다. 따라서 대형 소음기는 포신의 끝단에 장착하여 운용하기가 어려우므로, 별도의 구조물 형태로 설계하여 운용하는 것이 바람직할 것으로 예상된다.

본 연구는 소음기 특성 연구를 위하여 소음을 효과적으로 저감시킬 수 있는 기술적 방안을 도출하고자 하였으며, 실제 적용 및 운용 여부는 많은 trade-off 사항에 대한 운전자 측면의 검토가

필요하다.

3.4 제퇴력

포 사격 시 발생하는 반발력의 감소는 이동식 화기의 경량화 및 기동성의 증대를 가져온다. 제퇴기는 이러한 반발력을 감소시키는 포구 장치의 일종으로써 포탄의 진행방향과 동일하게 추력을 주어 사격에 의한 반발력을 감소시킨다. 이러한 이유로 배플의 역할을 제퇴의 관점에서도 살펴보았다.

Fig. 7은 제퇴력을 해석하기 위해 설정한 계산 영역이다. 1번과 8번 선이 소음기의 내벽에 작용하는 힘이며, 2 ~ 7번 선이 배플의 전후에 작용하는 힘을 나타낸다. +x축 방향으로 작용하는 힘이 제퇴력을 유발하게 된다.

Fig. 8은 각 배플 및 소음기의 내벽에 작용하는 힘을 4.5ms에서 계산한 그래프이다. x축은 배플의 수직 길이이며, y축은 단위가 kN인 배플 및 내벽에 작용하는 힘을 나타낸다.

(a)는 소음기의 양쪽 내벽에 수직으로 작용하는

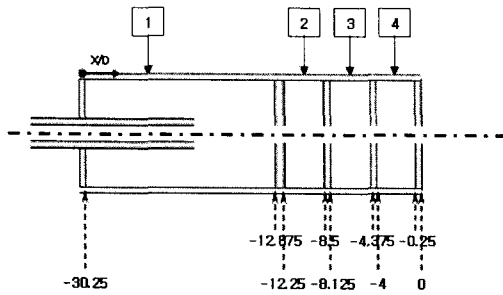
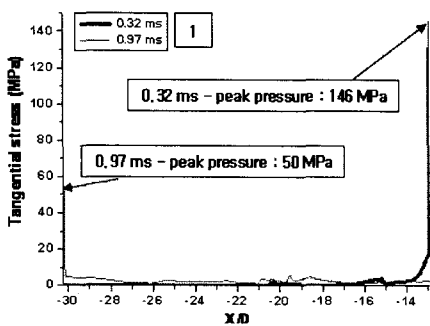
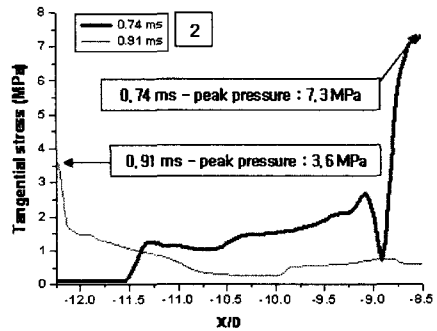


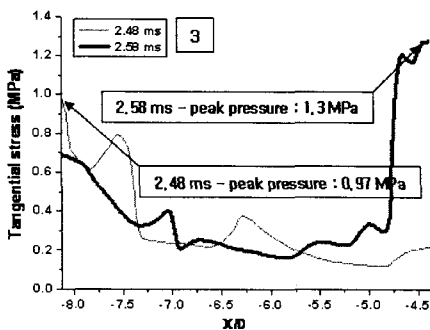
Fig. 5 Data lines of tangential stress on side walls in the silencer



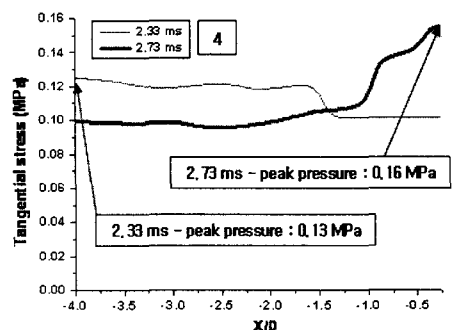
(a) Tangential stress variation along the side wall 1



(b) Tangential stress variation along the side wall 2



(c) Tangential stress variation along the side wall 3



(d) Tangential stress variation along the side wall 4

Fig. 6 Tangential stress variations along sidewalls

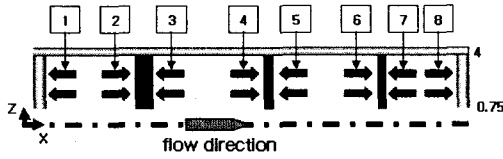


Fig. 7 Pressure forces on baffles and vertical walls

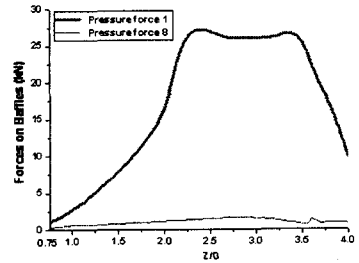
힘에 대해 나타낸 그림이다. 유동이 압축되어 있는 1번 내벽이 배플에 의해 압력 감소가 이루어진 8번 내벽에 비해 상대적으로 큰 힘을 받고 있는 것을 알 수 있다. 1번 내벽은 27kN, 8번 내벽은 1.6kN의 최대 힘이 계산되었다. 그리고 그림 (b)는 첫 번째 배플의 전후에 작용하는 힘의 분포를 보여주고 있다. 배플 전면에 작용하는 힘이 크게 나타나고 있으며, 이는 (c)와 (d)에서도 동일한 변화를 보이고 있다. 각각 2부터 7번까지의 배플 전후에 작용하는 최대 힘은 36kN, 11kN, 15kN, 5.5kN, 6kN, 그리고 1.6kN이다. 마지막으로 그림 (e)는 배플에 작용하는 +x 방향의 힘과 -x 방향의 힘을 모두 합하여 나타낸 제퇴력의 분포이다. 평균 약 10kN, 최대 16kN의 제퇴의 효과가 나타나고 있다. 따라서 배플 적용 시 제퇴력이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

3.5 소음기 출구 대기영역의 최대 압력

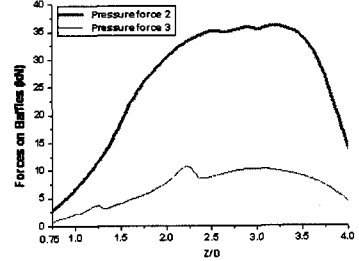
화기의 사격에 의해 발생된 폭발 유동은 소음기 내부에서 배플에 의해 그 사이를 왕복함에 따라 대기로 방출되는 시간이 지연된다. 또한 이러한 과정 동안 열전달이 발생하여 에너지가 소산된다. 결국 소음기를 지나 대기로 방출되는 순간에는 에너지의 양이 감소하여 최대 압력 및 소음이 감소하는 효과를 얻게 된다.

Fig. 9는 대기 영역에서 최대 압력을 계산한 지점을 나타낸 그림이다. 포신 지름으로 무차원화한 2와 4의 거리에서 0°~90°까지 각 7개의 지점을 설정하였다.

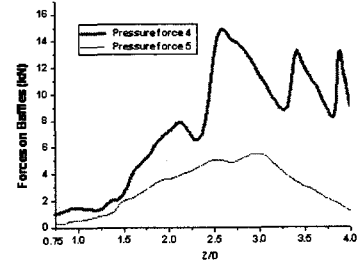
Fig. 10은 반지름 2인 지점과 4인 지점의 압력 변화를 나타낸 그래프이다. x축은 각도, y축은 시간(ms), 그리고 z축은 압력(kPa)을 나타낸다. (a)는 반지름 거리 2인 지점의 압력변화이고 (b)는 4인 지점의 압력변화이다. 두 그래프 모두 0°지점에서 최대 압력값을 보여주고 있으며, 압력 변화 역시 매우 심하게 진동하고 있다. 그리고 플럼 영역을 벗어나 충격파의 영향을 받지 않는 고각으로 갈수록 압력이 점차적으로 낮아지고 있으며, 저각



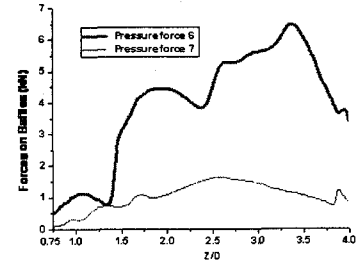
(a) Variations of pressure force 1 and 8



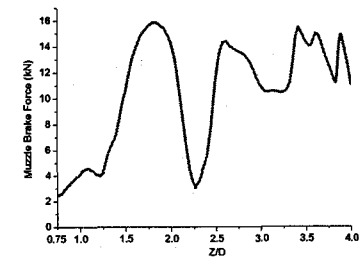
(b) Variations of pressure force 2 and 3



(c) Variations of pressure force 4 and 5



(d) Variations of pressure force 6 and 7



(e) Muzzle brake force variation

Fig. 8 Evolution of muzzle brake force

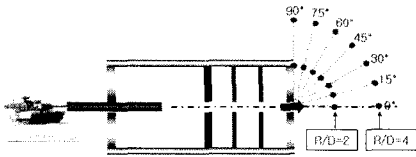
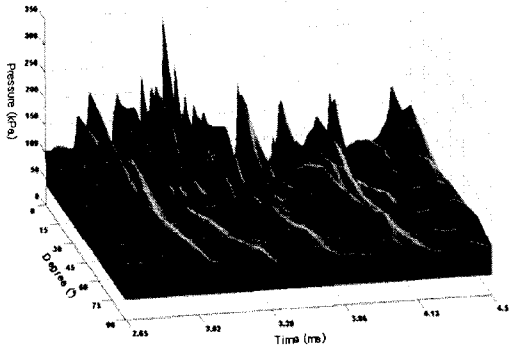
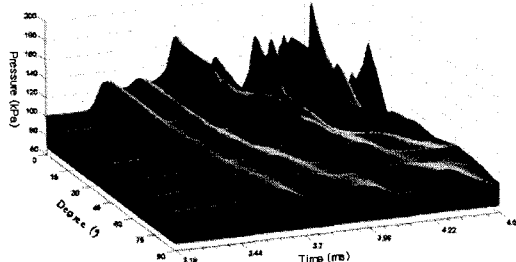


Fig. 9 Data points for calculating pressure outside the silencer



(a) Pressure variation at R/D=2



(b) Pressure variation at R/D=4

Fig. 10 Calculated pressure variations at points shown in Fig. 9

Table 1 The comparison of peak pressure and SPL for the with and without silencer at seven points of R/D=2 in atmosphere region

angle	Peak pressure		SPL	
	Without silencer	With silencer	Without silencer	With silencer
0°	24448 kPa	337 kPa	242 dB	204 dB
15°	23114 kPa	208 kPa	241 dB	200 dB
30°	16423 kPa	199 kPa	240 dB	200 dB
45°	9794 kPa	159 kPa	236 dB	198 dB
60°	5813 kPa	138 kPa	230 dB	196 dB
75°	1892 kPa	134 kPa	220 dB	196 dB
90°	846 kPa	127 kPa	213 dB	196 dB

Table 2 The comparison of peak pressure and SPL for the with and without silencer at seven points of R/D=4 in atmosphere region

angle	Peak pressure		SPL	
	Without silencer	With silencer	Without silencer	With silencer
0°	11768 kPa	189 kPa	235 dB	199 dB
15°	11868 kPa	156 kPa	235 dB	197 dB
30°	8345 kPa	133 kPa	233 dB	196 dB
45°	4009 kPa	123 kPa	227 dB	195 dB
60°	2642 kPa	116 kPa	222 dB	195 dB
75°	994 kPa	114 kPa	214 dB	195 dB
90°	724 kPa	115 kPa	211 dB	195 dB

에 비해 상대적으로 진동이 적어 압력 곡선의 부드러운 변화를 보여주고 있다.

Table 1과 2는 각각 R/D=2인 지점과 4인 지점에 대한 최대 압력과 이를 SPL로 전환한 값을 보여준다. 그리고 3개의 배플에 의해 발생하는 압력 및 소음 감소 효과를 비교 해석하기 위해 소음기가 적용되지 않은 형상을 계산하였다.⁽¹¹⁾ 먼저 R/D=2인 지점을 해석한 Table 1에서 볼 수 있듯이 0°에서는 99%, 90°에서는 85%의 최대 압력이 감소하였으며, 각각 38dB와 37dB의 SPL의 감소가 이루어졌다. 그리고 R/D=4의 해석 결과를 나타낸 Table 2의 경우 0°에서 98%, 90°에서 84%의 최대 압력이 감소하였다. 이를 토대로 SPL로 전환한 결과 36dB의 감소가 계산되었다.

4. 결론

본 논문에서는 120mm 전차포 사격 시 발생하는 고온 고압의 폭발유동장에 대한 배플형 소음기의 소음감소 및 제퇴 효과에 대해 해석하였다. 소음기를 지난 폭발 유동은 소음기가 없는 형상과 비교한 결과 대기 영역에서 최대 99%의 압력 및 41dB의 SPL 저감이 이루어졌다. 그리고 소음기 내부의 배플에 의해 발생하는 제퇴의 효과를 볼 수 있었다.

후기

본 연구는 국방과학연구소에서 시행한 기초연구사업 수행결과이며, 이 연구에 참여한 연구자

의 일부는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았습니다.

참고문헌

- (1) Fellx, Y. Y. and Lawrence, K., 1992, "Preliminary Report on Proposed Baffled Noise Abatement Structure," *NISTIR 4479*.
- (2) George, F. W. and Jeff, B., 1982, "Time-dependent Near Field Muzzle Brake Flow Simulations," *AIAA/ASME 3rd Joint Thermophysics, Fluid Plasma and Heat Transfer Conference, AIAA-82-0973*.
- (3) Fansler, K. S. and Lyon, D. H., 1989, "Attenuation of Muzzle Blast Using Configurable Mufflers," *Technical Report BRL-TR-2979*.
- (4) Fansler, K. S. and Wahldt, R. V., 1991, "A Muffler Design for Tank Cannon Acceptance Testing," *Memorandum Report BRL-MR-3931*.
- (5) Ko, S. H., 1999, "Numerical Analysis of Gas Flow Field of Perforated Muzzle Brake," *ADD Report UD970029CD*.
- (6) Hudson, M. K., Luchini, C., Clutter, J. K. and Shyy, W., 2001, "The Evaluation of Computational Fluid Dynamics Methods for Design of Muzzle Blast Suppressors for Firearms," *Propellants, explosives, pyrotechnics*, Vol. 26, No. 4, pp. 201~208.
- (7) Daniel, L. C., Nicolas, C., Mark, S. S. and Jean-Francois, R., 2003, "CFD Application to Gun Muzzle Blast - A Validation Case Study," *41st AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, AIAA-2003-1142*.
- (8) Karl-Wilhelm H., 2003, "An Overview on Military Weapon Noise : Its Physics and Annoyance," *Acoustical Seminar, Seoul National University of Korea, Seoul 2003*.
- (9) Lee, D. J., Lee, I. C., Woo, S. D., Kang, K. J. and Kim, I. W., 2005, "Study on Blast Noise in Supersonic Flow," *The 2005 Congress and Exposition on Noise Control Engineering*.
- (10) Ko, S. H., Woo, S. D. and Kang, K. J., 2004, "Numerical Analysis for a Simple Shape Silencer for Intensity Diminution of High Pressure Blast Flow Fields," *Korean Society of Computational Fluids Engineering Autumn Conference*, pp. 91~94.
- (11) Ko, S. H., Lee, D. S., Woo, S. D. and Kang, K. J., 2005, "Numerical Analysis for a Silencer of Tank Gun," *Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Vol. 10, No. 4, pp. 59~65.
- (12) Roe, P. L., 1981, "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors and Difference Schemes," *Journal of Computational Physics*, Vol. 43, pp. 357~372.
- (13) Jameson, A. and Yoon, S., 1987, "Lower-Upper Implicit Schemes with Multiple Grids for the Euler Equation," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 7, pp. 929~935.
- (14) Steger, J. L., Dougherty, F. C. and Benek, J. A., 1983 "A Chimera Grid Scheme," *American Society of Mechanical Engineers Fed*, Vol. 5, pp. 59~69.