한국음향학회지 제34권 제1호 pp. 60~65 (2015)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.34, No.1 (2015)
http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2015.34.1.060

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

선형마이크로폰 어레이를 이용한 총구 거리 추정 개선 방법

Improvement of Muzzle Localization Using Linear Microphone Array

정승우,† 김양한

(Seong-Woo Jung† and Yang-Hann Kim)

KAIST 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터(NOVIC)

(접수일자: 2014년 7월 31일; 수정일자: 2014년 9월 23일; 채택일자: 2014년 11월 4일)

초 록: 본 논문은 다수의 마이크로폰에서 측정된 총소리를 이용하여 총구와 마이크로폰 어레이 중심의 거리를 추정하는 방법을 개선하는 것이다. 은폐된 적의 위치인 총구와 마이크로폰 어레이 사이의 거리 추정은 군사적 목적 달성을 위하여 매우 중요하다. 총소리는 총구에서 추진가스의 팽창에 의해 발생하는 폭발음인 총구 폭풍파와 초음속으로 비행하는 탄환의 공기 파열음인 탄환 충격파로 구성된다. 현재까지 알려진 방법은 두 신호의 입사각과 도달 시간차를 이용하여 저격수의 거리를 추정한다. 그러나 이러한 기존 거리 추정 방법은 두 신호의 측정 입사각이 같은 경우에 거리 추정이 불가능한 단점이 있다. 이러한 한계점을 해결하기 위한 방법으로써 탄도 수직거리 증가에 따른 탄환 충격파의 특징 변화를 이용한 새로운 거리를 추정 방법을 제안하였으며 이를 사격 실험을 통해 증명하였다.
핵심용어: 총소리, 총구 폭풍파, 탄환 충격파, 거리 추정 방법

ABSTRACT: In this paper, we used the sound of gunshots recorded by multiple microphones to increase the accuracy of the calculation of the distance between sniper and the microphone array. This method is crucial for achieving military objectives. Gunshots are comprised of the explosion of driving gas from the muzzle and the supersonic shock wave from the flying bullet. The original distance calculation method compares the time difference of arrival and angle of incidence to estimate the sniper's location. The disadvantage of this method is that when the angles of incidence coincide the margin of error increases, to solve this problem we suggest a new method using the characteristic changes of the shock wave with the increase of perpendicular distance between the microphone and the trajectory of the bullet. This theory is verified by experiments.
Keywords: Gunshot, Muzzle blast, Projectile sound, Localization
PACS numbers: 43.60.Jn, 43.28.Mw

I. 서 론

은폐된 적은 보이지 않는 곳에서 사격하기 때문에 식별이 되지 않아 아군에게 많은 피해를 발생시킨다. 이러한 은폐된 적을 탐지하기 위해 시각 및 청각 정보를 이용한 방법이 있으나 시각정보에 의한 방법의 경우 특수 위장복과 장비의 발달로 인해 탐지가 제한되는 단점이 있다. 그러나 청각 정보인 총소리는 원거리까지 잘 전파되기 때문에 이러한 총소리를 이용하여 은폐된 적과 마이크로폰 어레이 중심 사이의 거리를 추정하는 방법을 개선하고자 한다.

이를 위해 총소리의 전파 특징을 이용한 기존 거리 추정 방법의 원리와 한계점을 확인하고 이를 개선하는 새로운 거리 추정 방법을 제안하고자 한다.

†**Corresponding author:** Seong-Woo Jung (dofel@kaist.ac.kr)
Center for Noise and Vibration Control (NOVIC), Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), 373-1 Guseong-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-701, Republic of Korea
(Tel: 82-42-350-3065, Fax: 82-42-350-8220)
"이 논문은 2014년 한국음향학회 춘계학술대회에서 발표하였던 논문입니다."

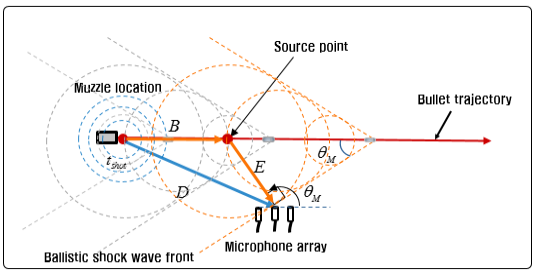

Fig. 1. The principle of gunshot signal propagation.

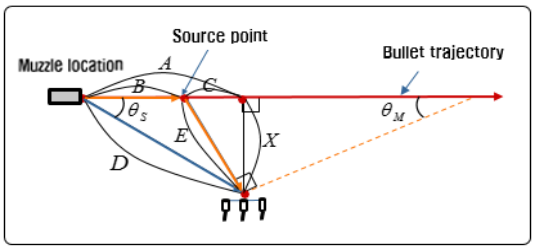

Fig. 2. The geometric relationship between the muzzle and the microphone array.

II. 기존 거리 추정 방법

본 연구에서 핵심 용어인 총소리는 추진가스의 팽창에 의한 총구 폭풍파와 초음속 탄환에 의한 공기 파열음인 탄환 충격파로 나눠진다.[1] 총구 폭풍파는 포강 내 고온, 고압의 추진제 가스가 총구를 이탈하는 순간에 한번 발생하는 음원으로 총구 전방 수십 미터 이상에서 점 음원으로 나타나며 음파속도로 전파된다.[2] 초음속 탄환에 의한 공기 파열음인 탄환 충격파는 탄환이 유체 속을 음속보다 빠른 속도로 이동할 때, 압력변화의 파면이 중첩되어 발생한다. 탄환 충격파의 파면은 탄환의 궤적을 따라 원뿔 형태로 전파된다. 일반적인 음원의 경우 거리 추정이 어렵지만 탄환이 초음속일 경우 총소리는 위와 같이 두 신호가 발생하고 각각 전파 원리가 다름으로 인해 거리를 추정할 수 있게 된다. 먼저 기존 거리 추정 방법의 원리와 한계점에 대해 알아보도록 하겠다.

기존 거리 추정 방법은 두 신호의 도달 시간차와 기하학적 관계식을 이용하여 구할 수 있다. 두 신호의 도달 시간차는 두 신호의 전파 원리를 통해 알 수 있다. 사격시간 t_0일 때, 총구 폭풍파의 도달 시간 t_1은 총구 위치에서 발생하며 측정 위치인 마이크로폰까지 음파속도 c로 전파된다. 그러나 탄환 충격파의 도달 시간 t_2은 총구에서 음원위치(source point)까지 탄환속도 v로 이동 후 음원위치에서 마이크로폰 위치까지 음파속도 c로 이동한다. 이러한 두 신호의 도달 시간차 Δt는

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{D}{c} - \left(\frac{B}{v} + \frac{E}{c}\right), \tag{1}$$

Eq.(1)과 같다. 그러나 거리변수 B, E와 탄환의 속도 v는 모르는 정보이므로 이러한 정보를 측정 가능한 변수인 방위각 θ_S와 마하각 θ_M, 그리고 도달 시간차 Δt로 변환하기 위해 기하학적 관계식을 적용한다.

Fig. 2는 총구와 측정위치의 기하학적 관계를 나타낸다. 이러한 관계는

$$\begin{aligned} &B = A - C = D\cos\theta_S - X\tan\theta_M, \\ &E = X/\cos\theta_M, \\ &\sin\theta_M = c/v,\ X = D\sin\theta_S, \end{aligned} \tag{2}$$

Eq.(2)와 같이 기하학적 관계식을 사용함으로써 측정 가능한 변수로 변환이 가능하다. Eq.(2)의 기하학적 관계식을 Eq.(1)에 대입하면

$$D = \frac{\Delta t \cdot c}{1 - \sin(\theta_M + \theta_S)}, \tag{3}$$

Eq.(3)과 같이 간단한 형태의 식으로 정리할 수 있다. 이 때 두 신호의 방위각 θ_S와 마하각 θ_M,그리고 도달 시간차 Δt를 측정할 경우 총구와 마이크로폰 어레이의 중심으로부터 거리를 구할 수 있다. 이러한 거리 추정 방법은 2003년 Bass *et al.*[3]에 의해 정립되었으며 이를 실험으로 증명하였다. 그러나 Eq.(3)에서 기하학적 관계식은 총구의 방향과 마이크로폰 어레이 방향이 일치하는 경우에 정리한 식이다. 그러므로 총구 방향 ω이 변화하더라도 거리 추정식이 변하지 않기 위해서는 측정된 두 신호의 입사각 차 $\theta_S' - \theta_M'$을 이용한 거리 추정식이 필요함을 알 수 있다.

Fig. 3은 총구 방향이 ω일 경우, 방위각과 마하각, 그리고 두 신호의 입사각차와의 기하학적 관계를 나타내며

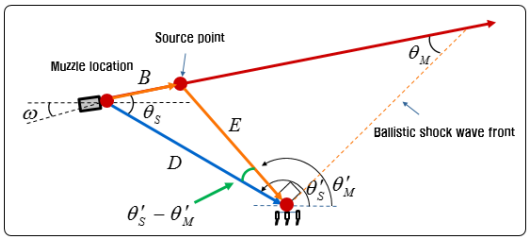

Fig. 3. Geometry of the bullet and propagation of the gunshot.

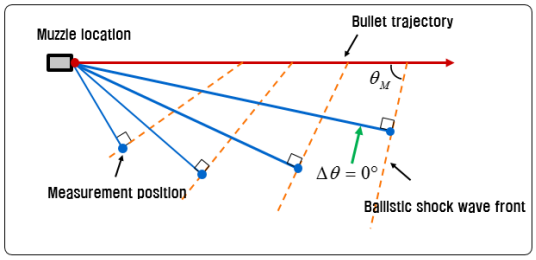

Fig. 4. Distance estimation error interval.

$$\theta_S+\theta_M=90+(\theta'_S-\theta'_M). \tag{4}$$

Eq.(4)와 같다. 이 때 Eq.(4)를 Eq.(3)에 대입하면 총구 방향에 관계없이 일반적인 거리 추정 방법인

$$D=\frac{\Delta t \cdot c}{1-\cos(\theta'_S-\theta'_M)}. \tag{5}$$

Eq.(5)로 정리할 수 있다. Eq.(5)에서 측정 변수인 두 신호의 입사각차와 도달 시간차를 구할 경우 총구와 마이크로폰 어레이 중심 사이의 거리를 구할 수 있다. 그러나 기존 거리 추정식은 두 신호의 입사각이 같은 경우 식이 성립하지 않는 한계점이 있다. 또한 이러한 거리 추정 미성립 구간은 탄환의 속도가 공기 저항으로 인해 감소하기 때문에 Fig. 4와 같이 계속적으로 나타나게 된다.

III. 새로운 거리 추정 방법

새로운 거리 추정 방법의 원리는 탄환 궤적으로부터 수직거리 증가에 따른 탄환 충격파의 특징 변화를 이용한다. 여기서 탄환 충격파를 N파라고 한다. 그 이유는 초음속인 탄환의 모양에 의해 유체의 흐름이 급격하게 변화하기 때문에 압력 변화 파면이

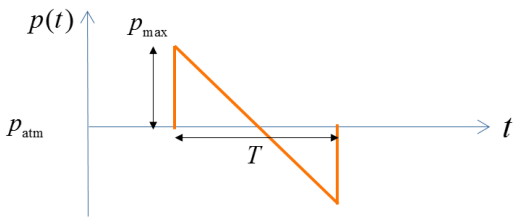

Fig. 5. Shape of the ballistic shock wave (or N-wave).

중첩되어 두 번의 갑작스런 압력 상승이 발생하기 때문이다. 두 번의 불연속성들은 보통 선수파와 꼬리파라고 부르며 지속시간 만큼 분리되어 나타난다. 이러한 압력 상승으로 탄환 충격파의 신호파형은 대기압에서 갑작스런 압력상승에 이어 대략적인 기존 상승만큼 선형 감소, 그리고 다시 대기압으로의 갑작스럽게 돌아간다.

Fig. 5는 탄환 충격파의 신호파형을 나타낸다. 또한 탄환 충격파의 최대진폭 $p_{\max}$와 지속시간 T는 "Weak-shock 이론"에 기초하여 예측할 수 있다. 이러한 탄환 충격파의 전파와 손실에 대한 내용은 1946년 DuMond *et al.*[4]에 의해 수학적으로 해석되었으며, 그 결과 탄환 궤적의 수직거리 X에 따라 탄환 충격파의 최대 진폭은 감소하고, 지속시간은 증가함을 증명하였다. 또한 1952년 Whitham[5]은 탄환 충격파의 최대 진폭과 지속시간에 대한 근사식을 정립하였다. 이를 Whitham[5]의 근사식이라고 하며

$$p_{\max}=0.53\frac{p_0(M^2-1)^{1/8}}{X^{3/4}}\cdot\frac{d}{l^{1/4}}, \tag{6}$$

$$T=1.82\frac{M\cdot X^{1/4}}{c(M^2-1)^{3/8}}\cdot\frac{d}{l^{1/4}}, \tag{7}$$

Eqs.(6)과 (7)로 나타낸다. Eqs.(6)과 (7)에서 각 변수는 탄환의 길이 l, 탄환의 직경 d, 탄도 수직거리 X, 마하수 M, 대기압력 p_0, 음파속도 c이다. 이러한 Whitham[5] 근사식은 1969년 Snow[6]에 의해 실험으로 검증되었다.

Eqs.(6)과 (7)을 정리하면

$$\frac{p_{\max}}{T}=\frac{0.53p_0c\sqrt{(M^2-1)}}{1.82MX}. \tag{8}$$

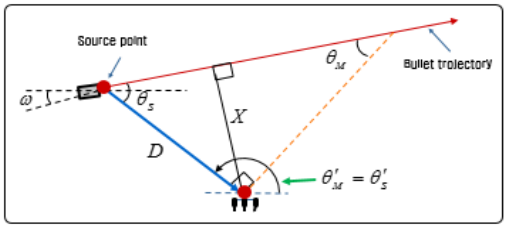

Fig. 6. Geometry of the bullet's trajectory and ballistic shock wave cone.

Eq.(8)과 같이 된다. Eq.(8)에서 탄도 수직거리 X를 구하기 위해서는 탄환 충격파의 최대진폭 $p_{\max}$,지속시간 T, 마하수 M를 측정해야 한다. 그러나 탄환의 속도가 변화함으로 인해 마하수를 측정가능한 마하각으로 나타내면

$$\theta_M = \sin^{-1}(1/M), \tag{9}$$

$$X = \frac{0.53 p_0 c \cos\theta_M}{1.82} \cdot \frac{T}{p_{\max}}. \tag{10}$$

Eq.(10)과 같이 탄도 수직거리는 탄환 충격파의 최대진폭 $p_{\max}$, 지속시간 T, 마하각 θ_M의 함수로 이루어진다.

Fig. 6은 기존 거리 추정이 성립하지 않는 구간의 한 예를 보여준다. 이러한 기하학적 관계에서 구하고자 하는 거리 D는

$$D = X/\sin\theta_S. \tag{11}$$

Eq.(11)과 같다. 여기서 앞에서 구한 탄도 수직거리(X)인 Eq.(10)을 대입하면

$$D = \frac{0.53 p_0 c T}{1.82 p_{\max}} \cdot \frac{\cos\theta_M}{\cos[\theta_M - (\theta'_S - \theta'_M)]}. \tag{12}$$

Eq.(12)와 같이 정리할 수 있다. 그러나 두 신호의 입사각이 같을 경우 $\theta'_S - \theta'_M = 0$이므로

$$D = \frac{0.53 p_0 c}{1.82} \cdot \frac{T}{p_{\max}}. \tag{13}$$

Eq.(13)과 같이 마하각을 추정하지 않아도 탄환 충격파의 최대진폭 대 지속시간 정보만으로 거리를 추정이 가능해 진다. 즉, 기존 거리 추정식에서 미성립 했던 구간에서 Eq.(13)을 사용함으로써 거리 추정이 가능하다.

IV. 사격실험 결과

실험 목적은 기존 거리 추정이 되지 않는 구간에서 새로운 거리 추정 방법을 사용함으로써 총구와 마이크로폰 어레이 중심사이의 거리 추정을 하는 것이다. 이와 같은 목적 달성을 위한 실험 장치 구성 및 측정 조건은 다음과 같다. 신호 발생장치는 k-14 저격용 소총을 사용하였으며 탄약은 RUAG 7.62×51 mm 탄을 사용하였다. 측정 조건은 기온 35℃, 바람 1.2 m/s, 습도 35 %, 암 소음(background noise)은 51.4 dB이다. 모든 마이크로폰은 B&K array microphone ICP type-4935를 사용하였으며, 1/4" free-field microphone으로 민감도는 5.6 mV/Pa이다. 선형 마이크로폰 어레이는 11개의 센서 $N=11$로 구성되어 있으며 등 간격 d=0.1 m로 지상으로부터 높이는 1.5 m에 배치되었다. 데이터 수집 장치는 cDAQ-9178(51.2 kHz ±5 V, 32 bit)을 사용하였다. 측정 장소는 250 m×50 m로 주변에건물은 없으며 개활지로 이루어져 있다. 먼저 예비 실험을 통해 두 신호의 입사각이 같은 지점을 선정하였다. 두 신호의 입사각이 같은 경우에 실험 조건은 총구와 마이크로폰 어레이 중심 사이의 실제거리는 30.76 m이고 방위각은 56°이다.

Fig. 7(a)은 두 신호의 입사각이 같은 경우에 측정된 총소리로, 탄환 충격파와 총구폭풍파가 중첩된 신호이다. 새로운 거리 추정식을 사용하기 위해서는 먼저 중첩 신호에 탄환 충격파만을 분리해야 한다. 두 신호의 분리가 가능한 이유는 주파수 영역에서 두 신호의 에너지 분포가 다름으로 인해 가능하다. 본 연구에서는 고역통과필터[차단주파수 800 Hz, 차수(100)]를 사용하여 탄환 충격파의 특징인 최대진폭과 지속시간 정보를 추출하였다. Fig. 7(b)는 중복 신호에서 필터링된 탄환 충격파를 나타낸다. 여기서 탄환 충격파의 지속시간은 $T=273\sim293\ \mu s$이다. 그러나 최대진폭의 경우 중복 신호 때문에 오차가 많이

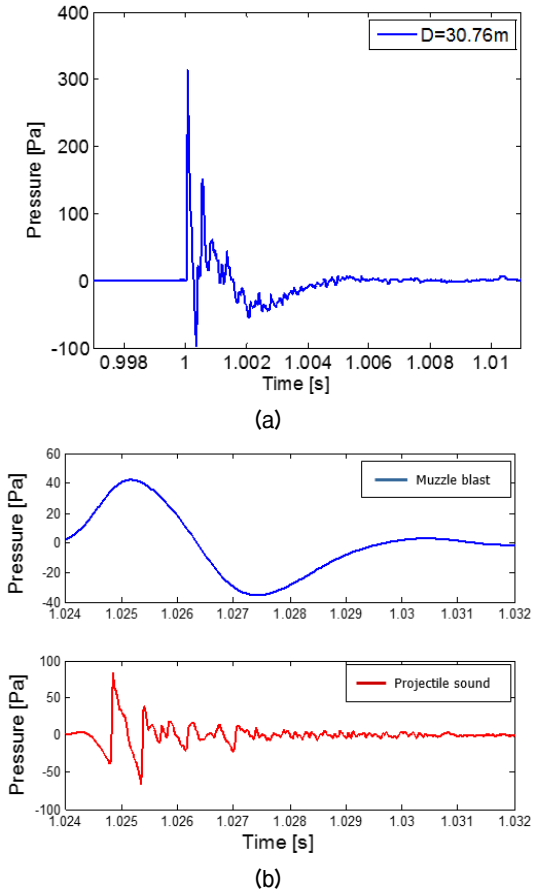

Fig. 7. Measured signal (a) overlap of the two signals, (b) separation of the two signals.

발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 먼저 탄환의 구경을 한정해야 한다.

$$p_{\max} = 3.2\frac{p_0 M^3}{c^3(M^2-1)} \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \frac{1}{T^3}. \tag{14}$$

Eq.(14)는 Whitham[5] 근사식에서 탄환 충격파의 최대진폭을 구하는 근사식으로 탄환의 구경과 지속시간을 알 경우 최대진폭을 추정할 수 있음을 보여준다. 이렇게 구한 탄환 충격파의 최대진폭은 $p_{\max}$ = 84.5 ~ 104.5 Pa이다. 이와 같은 식을 통해 최대진폭 특징 추출간 발생하는 오차를 줄일 수 있다. 이렇게 구한 거리는 실제 거리는 30.76 m에서 사격 5발 평균 거리 추정한 결과는 30.75 m이고 실제 거리 대비 추정 거리 오차는 0.1 %, 표준 편차는 5 m이다.

V. 결 론

현재까지 알려진 방법은 총소리의 특징과 두 신호의 도달 시간차를 이용하여 총구와 마이크로폰 어레이 중심 사이의 거리를 추정하였다. 그러나 이러한 기존 거리 추정 방법은 두 신호의 입사각이 같은 경우에 식이 미성립하여 거리를 추정할 수 없는 한계점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 새로 제안한 거리 추정 방법은 기존 거리 추정 미성립 구간에서 탄환 충격파의 최대진폭과 지속시간 정보만을 이용하여 이러한 한계점을 해결할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 연구과제(No. 10037244)와 교육과학기술부에서 착수한 BK프로젝트, 국방과학연구소와 방위사업청의 재원으로 국방무인화연구센터(UTRC)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. ISO 17201-4:2006(en), *Acoustics — Noise from shooting ranges — Part 4: Prediction of projectile sound.*
2. K. J. Kang, "An evaluation of silencer characteristics by live firing test" (in Korean), Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology **10**, 217-224 (2007).
3. H. E. Bass, B. A. Layton, and L. N. Bolen, "Propagation of medium strength shock waves through the atmosphere," J. Acoust. Soc. Am. **82**, 306-310 (1987).
4. J. W. DuMond, E. R. Cohen, W. K. H. Panofsky, and E. Deeds, "A determination of the wave forms and laws of propagation and dissipation of ballistic shock waves," J. Acoust. Soc. Am. **18**, 97-118 (1946).
5. G. B. Witham, *Communication on Pure and Applied Mathematics* (A wiley company, New York, 1952), pp 301-348.
6. W. Snow, "Survey of acoustic characteristics of bullet shock waves," Audio and Electroacoustics, IEEE Transactions on 15. 4, 161-176 (1967).

저자 약력

▸ 정 승 우 (Seong-Woo Jung)

2003년 3월: 육군3사관학교 기계공학과 (학사)
2014년 8월: KAIST 기계공학과 석사(석사)
2014년 9월 ~ 현재: 육군기계화학교 교리장교
<관심분야> 음향 신호처리, 음장 가시화

▸ 김 양 한 (Yang-Hann Kim)

1973년: 서울대학교 조선공학과(학사)
1985년: Massachusetts Institute of Technology Mechanical Engineering(O.E. Program) (박사)
1989년 2월 ~ 현재: 한국과학기술원 기계공학과 부교수, 교수
<관심분야> 오디오 신호 처리, 음장 가시화, 다채널 신호 분석및 제어