Journal of the KIMST, Vol. 21, No. 4, pp. 447-455, 2018
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2018.21.4.447

Research Paper 센서 · 신호처리 부문

선형마이크로폰 어레이를 이용한 저격수 거리추정 개선방법과 실험 분석

정 승 우*,1)

1) 합동참모본부 군사지원본부

Improvement Method and Experiment Analysis of Sniper Distance Estimation Using Linear Microphone Array

Seungwoo Jung*,1)

1) *The Military Support Division, Joint Chiefs of Staff Headquarters, Korea*

(Received 19 December 2017 / Revised 8 March 2018 / Accepted 6 July 2018)

ABSTRACT

If a hidden enemy is shooting, there is a threat against soldiers in recent conflicts. This paper aims to improve the localization of a muzzle using microphone array. Gunshot noise can provide information about the location of muzzle with two signals, the muzzle blast from the gun barrel and the projectile sound from the bullet.

Two signals arrive to the microphone array with different arrival time and angle. If the arrival angles of the two signals are estimated, distance between sniper location and the microphone array can be calculated by using geometric principles. This method was established in 2003 by Pare. But this method has a limitation that it cannot calculate the distance when the arrival angles of the two signals are same. Also it has an error when the angle difference of arrival is small.

In order to overcome this limitation, a new method is proposed that uses the change of characteristic of the projectile sound with respect to vertical distance from the trajectory. The proposed method estimates the distance correctly when the arrival angle of two signals are same, and when the angle difference between two signals is increased, the estimation error increases with respect to the angle.

Therefore these two methods can be selected according to the angle difference between two signals to estimate the distance of the muzzle. Below the threshold of the angle difference, the proposed method can be used to estimate distance with smaller error than the existing method. This was demonstrated by shooting tests using actual sniper rifles.

Key Words : Gunshot(총소리), Muzzle Blast(총구폭풍파), Projectile Sound(탄환충격파), Localization(거리추정)

* Corresponding author, E-mail: dofel@kaist.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 개발 동기 및 목적

은폐된 적의 정확한 위치 추정을 위해서는 방향뿐만 아니라 거리 추정이 필수적이다. 은폐된 적의 거리 추정이 필요한 이유는 사격 방향만을 인지할 경우 신속한 은·엄폐로 자신을 보호할 수 있으나 거리를 인지하지 못한다면 적의 정확한 위치를 추정하지 못하고 이로 인해 효과적인 적 제압이 불가능하다. 또한 이러한 상황조치는 사람에 의해 이루어지며 이러한 과정은 저격수의 정확한 위치를 식별한 이후에도 매우 위험하다. 이러한 위험한 과정을 막기 위해 현대전의 경우 다양한 무인로봇을 개발 중에 있으며 이러한 공격용 무인로봇에 저격수를 제압하기 위해서는 저격수의 방향뿐만 아니라 정확한 거리 추정이 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 마이크로폰 어레이를 이용하여 총구 위치와 마이크로폰 어레이 중심 사이의 거리 추정 방법을 개선하는 것이다.

2. 거리추정방법 1

본 연구에서 핵심 용어인 총소리는 추진가스의 팽창에 의한 총구 폭풍파(muzzle blast), 초음속 탄환에 의한 공기파열음인 탄환 충격파(projectile sound), 두 가지로 나눠진다[1]. 총구 폭풍파는 포강 내 고온, 고압의 추진제 가스가 총구를 이탈하는 순간에 한번 발생하는 음원이다. 이러한 총구 폭풍파는 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 원뿔형태로 전파된다.

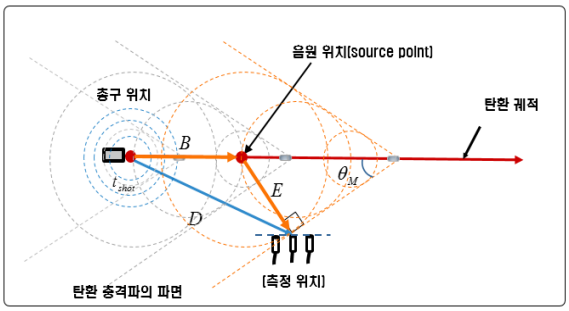


Fig. 1. The principle of gunshot signal propagation

일반적인 음원의 경우 거리 추정은 어렵지만 총소리는 탄환이 초음속일 경우 두 신호가 발생하고 각각 전파 원리가 다름으로 인해 거리를 추정할 수 있다. 먼저 기존 거리 추정 방법의 원리와 한계점에 대해 알아보도록 하겠다.

거리추정방법 1은 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_1)은 총구 위치에서 발생하며 측정 위치인 마이크로폰까지 음파속도(c)로 전파된다. 또한, 탄환 충격파의 도달 시간(t_2)은 총구에서 음원위치(source point)까지 탄환속도(v)로 이동 후 음원위치에서 측정 위치까지 음파속도(c)로 이동한다. 이러한 두 신호의 도달 시간차(Δt)은

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

식 (1)과 같이 나타내며 두 신호의 거리 전파시간의 차와 같다. 그러나 거리변수(B, E)와 탄환의 속도(v)는 모르는 정보이므로 이러한 정보를 측정 가능한 변수인 방위각(θ_S)과 마하각(θ_M), 그리고 도달 시간차(Δt)로 변환하기 위해 기하학적 관계식을 적용한다.

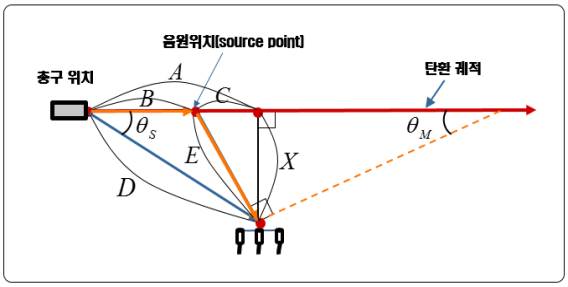


Fig. 2. The geometric relationship between the muzzle and the microphone array

Fig. 2는 총구와 측정위치의 기하학적 관계를 나타낸다. 이를 정리하면

$$B = A - C = D\cos\theta_s - X\tan\theta_M\ ,\ E = X/\cos\theta_M$$
$$\sin\theta_M = c/v,\ X = D\sin\theta_S \quad (2)$$

식 (2)와 같은 기하학적 관계식을 사용함으로써 측

정 가능한 변수로 변환이 가능하다. 식 (2)의 기하학적 관계식을 식 (1)에 대입하여 정리하면

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

식 (3)과 같이 간단한 형태의 식으로 정리할 수 있다. 이 때 두 신호의 방위각(θ_S)과 마하각(θ_M), 그리고 도달 시간차(Δt)를 측정할 경우 총구와 마이크로폰 어레이의 중심으로부터 거리를 구할 수 있다. 이러한 거리추정방법 1은 2003년 Pare[3]에 의해 정립되었으며 이를 실험으로 증명하였다. 그러나 식 (3)은 총구의 방향과 마이크로폰 어레이 방향이 일치하는 경우에서 가능한 식이며 총구 방향이 어레이 방향과 다를 경우 정확한 마하각과 방위각을 구하지 못한다. 따라서 이를 보다 일반적인 식으로 정리하기 위하여 총구 방향이 ω로 어레이의 방향과 다를 경우에 대해 알아보도록 하겠다.

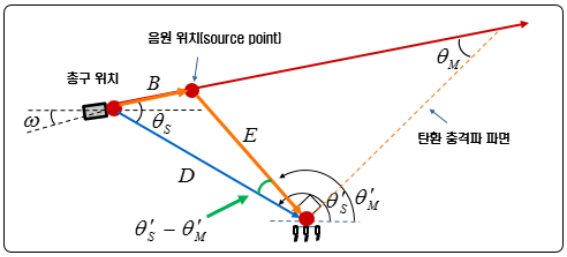


Fig. 3. Geometry of the bullet and propagation of the gunshot

총구의 방향(ω)이 변화하더라도 측정된 두 신호의 입사각 차($\theta_S'-\theta_M'$)는 변화하지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러므로 측정된 두 신호의 입사각의 차를 이용하면 보다 일반적인 식을 유도할 수 있다. Fig. 3은 총구 방향이 ω일 경우 방위각과 마하각이 두 신호의 입사각의 차와의 기하학적 관계를 나타내며 이를 정리하면

$$\theta_S+\theta_M=90+(\theta_S'-\theta_M') \tag{4}$$

식 (4)와 같다. 이 때 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 총구방향에 관계없이 일반적인 거리 추정 방법인 식 (5)로 정리할 수 있다.

$$D=\frac{\Delta t \cdot c}{1-\cos(\theta_S'-\theta_M')} \tag{5}$$

식 (5)에서 측정 변수인 두 신호의 입사각의 차와 도달 시간차($\theta_S'-\theta_M'$, Δt)를 구할 경우 총구와 마이크로폰 어레이 중심 사이의 거리를 구할 수 있다. 식 (5)에서 두 신호의 도달 시간차(Δt)와 두 신호의 입사각 차($\theta_S'-\theta_M'$)가 탄환의 속도와 측정 위치에 따라 같이 변화하기 때문에 민감도를 분석하는 것은 어려운 일이다. 그러나 마하각이 일정하며 거리가 같은 구간에서 두 신호의 입사각 차의 변화는

$$\Delta\theta=\theta_S'-\theta_M' \tag{6}$$

$$D_E=\frac{\Delta t \cdot c}{1-\cos(\Delta\theta)} \tag{7}$$

식 (7)과 같이 나타낼 때, $\Delta\theta$의 변화에 따른 실제 거리(D)와 추정 거리(D_E)의 민감도를 확인할 수 있다.

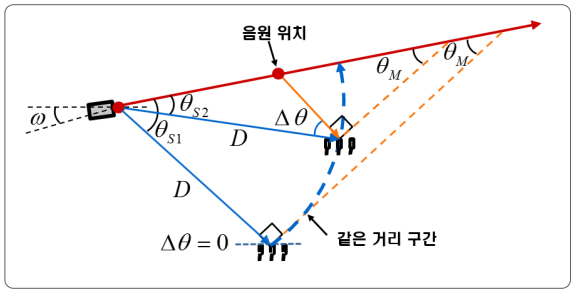


Fig. 4. Distance estimation according to $\Delta\theta$

Fig. 4는 마하각(θ_M)이 일정할 경우, 실제 거리(D)가 같은 구간에서 $\Delta\theta$가 변함으로 인해 실제거리와 추정거리의 민감도를 확인할 수 있다.

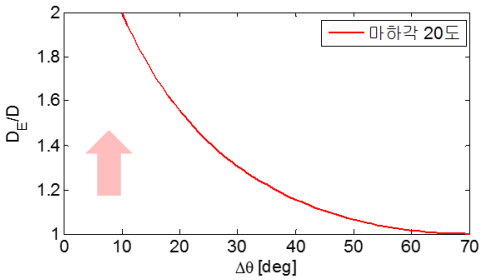


Fig. 5. Sensitivity analysis

Fig. 5는 $\Delta\theta$의 변화에 따른 실제 거리 대 추정거리 오차를 나타낸 것이다. 이러한 거리추정방법 1은 다음과 같은 2가지 한계점이 있다. 첫째, 두 신호의 입사각의 차가 $\Delta\theta \simeq 0$에 가까울수록 거리 추정 오차가 증가한다. 둘째, 식 (5)에서 $\Delta\theta = 0$인 경우 식이 발산하여 성립하지 않는다.

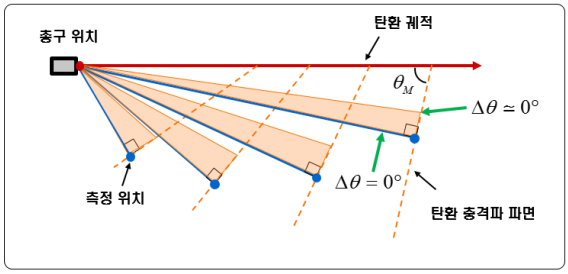


Fig. 6. Distance estimation error interval

Fig. 6은 총구와 마이크로폰 사이의 거리 증가에 따른 마하각 감소를 고려한 기존 거리 추정 오차를 보여준다. 이때 탄환의 속도는 마이크로폰 어레이 측정 구간에서는 그 변화가 매우 작음으로 인하여 측정 구간 내에서는 일정하다고 가정한다.

3. 거리추정방법 2

거리추정방법 1의 한계점인 두 신호의 입사각의 차가 작아질수록 거리 오차가 증가하는 구간에서 거리 추정 오차를 줄이기 위한 거리추정방법 2를 제안하고자 한다.

거리추정방법 2의 원리는 탄환 궤적으로부터 수직거리 증가에 따라 탄환 충격파의 특징이 변화하는 것을 이용한다. 여기서 탄환 충격파의 특징을 N파라고 하는데 그 이유는 초음속인 탄환의 모양에 의해 유체의 흐름이 급격하게 변화하면서 압력 변화 파면이 중첩되어 두 번의 압력 불균형성인 갑작스런 압력 상승이 발생하기 때문이다. 두 번의 불연속성들은 보통 머리파(bow-shock)과 꼬리파(tailing-shock), 혹은 압축파(compression wave)와 팽창파(expansion wave)라고 부르며 지속시간 T만큼 분리되어 나타난다. 이러한 압력 상승으로 탄환 충격파의 신호파형은 대기압에서 갑작스런 압력상승에 이어 대략적인 기존 상승만큼 선형 감소, 그리고 대기압으로의 갑작스럽게 돌아감으로 인해 생긴다.

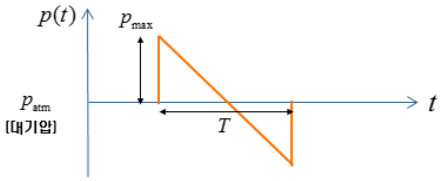


Fig. 7. Shape of the ballistic shock wave(or N-wave)

그러므로 탄환 충격파의 신호파형은 Fig. 7과 같이 N파형을 갖기 때문에 N파라고도 한다. 또한 탄환 충격파의 최대진폭(P_{max})과 지속시간(T)은 "Weak-shock 이론"에 기초하여 예측할 수 있다. 이러한 탄환 충격파의 전파와 손실에 대한 내용은 1946년 J. W. M. DuMond[4]에 의해 수학적으로 해석되었으며, 그 결과 탄환 궤적의 수직거리(X)에 따라 탄환 충격파의 최대진폭(P_{max})은 감소하고, 지속시간(T)은 증가함을 증명하였다. 또한 1952년 G. B. Whitham[5]은 탄환 충격파의 최대 진폭(P_{max}), 지속시간(T)에 대한 근사식을 정립하였으며 식 (8)과 (9)이다.

$$P_{max} = 0.53\frac{P_0(M^2-1)^{1/8}}{X^{3/4}} \cdot \frac{d}{l^{1/4}} \tag{8}$$

$$T = 1.82\frac{M \cdot X^{1/4}}{c(M^2-1)^{3/8}} \cdot \frac{d}{l^{1/4}} \tag{9}$$

식 (8)과 (9)에서 각 변수는 탄환의 길이(l), 탄환의 직경(d), 탄도 수직거리(X), 마하수(M), 대기압력 P_0이고 음파속도는 c이다. 이러한 Whitham 근사식은 1969년 W. Snow[6]에 의해 실험으로 검증되었다.

식 (8)과 (9)에서 $\frac{d}{l^{1/4}}$를 정리하면

$$\frac{P_{max}}{T} = \frac{0.53P_0c\sqrt{(M^2-1)}}{1.82MX} \tag{10}$$

식 (10)과 같이 된다.

식 (10)에서 탄도 수직거리(X)를 구하기 위해서는 탄환 충격파의 최대진폭(P_{max}), 지속시간(T), 마하수(M)를 측정해야 한다. 그러나 탄환의 속도가 변화함으로 인해 마하수를 마하각으로 치환하면

$$\theta_M = \sin^{-1}(1/M) \tag{11}$$

$$X = \frac{0.53P_0 c\cos\theta_M}{1.82} \cdot \frac{T}{P_{\max}} \tag{12}$$

식 (12)와 같이 탄도 수직거리는 탄환 충격파의 최대진폭($P_{\max}$)과 지속시간(T), 그리고 마하각(θ_M)의 함수로 이루어진다.

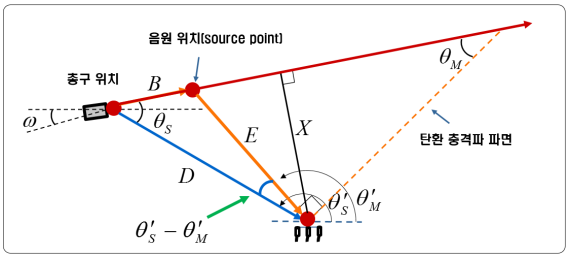


Fig. 8. Geometry of the bullet's trajectory and ballistic shock wave cone

Fig. 8은 앞에서 구한 탄도 수직거리와 기하학적 관계를 나타낸다. 이러한 기하학적 관계를 이용하면 총구와 마이크로폰 사이의 거리는

$$D = \frac{0.53P_0 cT}{0.82P_{\max}} \cdot \frac{\cos\theta_M}{\cos\left[\theta_M - (\theta'_S - \theta'_M)\right]} \tag{15}$$

식 (15)와 같이 정리할 수 있으나 마하각 정보는 측정 거리에 따라 변화함으로 인하여 측정하지 못한다. 그러나 두 신호의 입사각이 같을 경우($\theta'_M - \theta'_S = 0$), 마하각을 추정하지 않아도 탄환 충격파의 최대진폭 대 지속시간 정보만으로 거리를 추정할 수 있다.

$$D = \frac{0.53P_0 c}{1.82} \cdot \frac{T}{P_{\max}} \tag{16}$$

4. 구분 알고리즘

거리추정방법 1은 두 신호의 입사각의 차가 적을 경우, 거리 추정 오차가 증가하며, 거리추정방법 2는 두 신호의 입사각이 차가 커질수록 거리 추정 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 2가지 거리추정방법은 두 신호의 입사각의 차에 따라 거리 추정 오차가 달라지기 때문에 이러한 두 신호의 입사각의 차($\Delta\theta$)에 따른 2가지 거리추정방법들 중 어떤 알고리즘을 사용할지를 결정해야 한다. 다시 말해 두 신호의 입사각 차에 따른 거리 추정 방법을 구분하기 위한 문턱값(threshold)의 선정이 필요한 것이다.

$$D_{E1} = \frac{\Delta t \cdot c}{1-\cos(\Delta\theta)} \tag{17}$$

$$D_{E2} = \frac{0.53P_0 cT}{0.82P_{\max}} \cdot \frac{\cos\theta_M}{\cos\left[\theta_M - (\theta'_S - \theta'_M)\right]} \tag{18}$$

식 (17)은 거리추정방법 1을, 식 (18)은 거리추정방법 2를 나타낸다. 문턱값(threshold) 선정은 측정 거리에 변화에 따라 $\Delta\theta$이외의 요소인 두 신호의 도달 시간차(Δt)와 탄환 충격파의 최대진폭 대 지속시간($P_{\max}$, T) 또한 변화하기 때문에 이러한 문제를 해결하는 것은 어렵다. 그러나 실제 거리가 같은 구간에서 마하각이 일정할 경우 $\Delta\theta$의 변화에 따른 2가지 거리추정 방법의 거리 추정 오차를 확인할 수 있다.

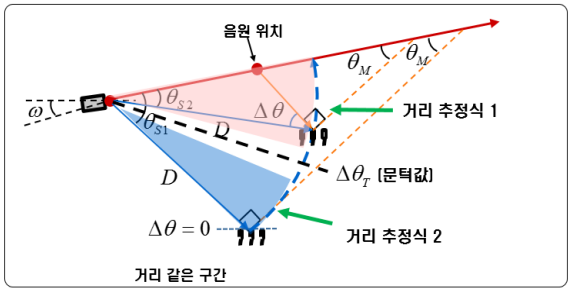


Fig. 9. Distinct algorithm(Threshold selection)

Fig. 9는 마하각이 일정할 때, 거리가 같은 구간에서 방위각의 변화에 따른 두 신호의 입사각 변화를 나타낸다. 이러한 두 신호의 입사각 차의 변화량($\Delta\theta$)에 따라 2가지 거리추정방법의 실제 거리(D)에 따른 추정거리(D_E)의 오차를 확인함으로써 문턱값($\Delta\theta_T$)을 선정한다.

Fig. 10은 마하각이 20도 일 때, 두 신호의 입사각 차($\Delta\theta$)의 변화에 따른 거리추정 1과 거리추정 2의 거리 추정 오차가 같아지는 지점인 문턱값($\Delta\theta_T$)을 나타낸다. 2가지의 거리추정방법을 선택하기 위한 문턱값

선정은 먼저 운용 거리를 결정하고 운용 거리에 따른 최대 마하각을 추정하여 $\Delta\theta$에 따른 2가지 거리 추정 방법의 거리 추정 오차가 같아지는 지점 문턱값을 선정할 수 있다. 본 연구에서 운용 거리는 2차 세계대전, 한국전쟁 및 월남전 등 전쟁 기록 분석결과 적과의 교전이 95 %로 가장 많이 발생하는 400 m 이내[7]로 선정한다.

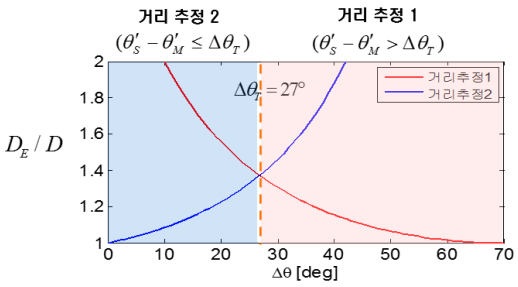


Fig. 10. Classification algorithm(Mach angle 20°)

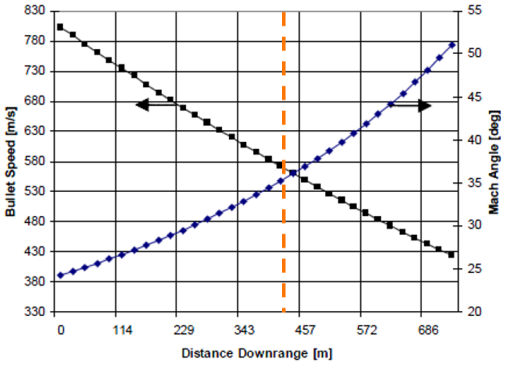


Fig. 11. Mach angle change according to bullet speed[8]

Fig. 11에서와 같이 탄환의 속도는 거리 전파에 따라 공기저항으로 인해 감소하며 반대로 마하각은 증가한다. 따라서 운용 거리 400 m에서 최대 마하각은 35도를 갖는다. 마하각 35도일 경우 $\Delta\theta$의 변화에 따라 2가지 거리 추정 방법의 거리 추정 오차를 확인한다.

운용 거리 400 m 이내에서 거리 추정 방법 구분을 위한 문턱값은 $\Delta\theta_T$ = 15°가 된다. 이러한 문턱값에 따른 거리 추정 방법 선택은 두 신호의 입사각 차가 문턱값 이하에서는 거리추정 2를 선택하고, 문턱값 초과시 거리 추정 1을 사용함으로써 거리 추정 오차를 감소시킬 수 있다.

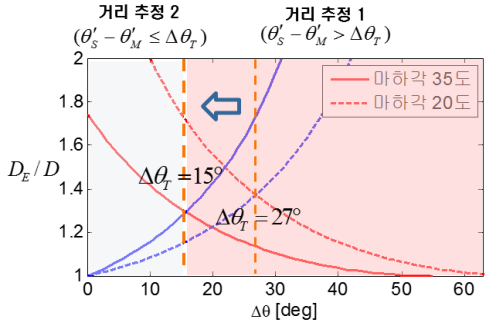


Fig. 12. Threshold variation according to mach angle

5. 실험결과

실험 목적은 앞에서 제시한 문턱값 내에서 거리추정방법 1을 사용함으로써 거리 추정 오차가 감소하는지를 확인한다. 또한 두 신호의 입사각이 같은 구간에서 거리 추정에 대한 한계점을 극복하고자 한다.

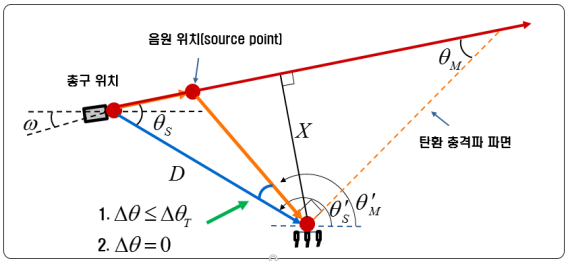


Fig. 13. How to improve distance estimation

이와 같은 2가지 목적 달성을 위한 실험 장치 구성 및 측정 조건은 다음과 같다. 신호 발생 장치는 k-14 저격용 소총을 사용하였으며 탄약은 RUAG 7.62 × 51 mm탄을 사용하였다. 이 탄약은 총구 속도 790 m/s이다. 측정 조건은 기온 35도, 바람 1.2 m/s, 습도 35 %, 암 소음(background noise) 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 m)으로 지상으로부터 높이는 1.5 m에 배치 되었다. 데이터 수집 장치는 cDAQ-9178(샘플링 주파수 51.2 kHz, 32 bit, ±5 V)을 사용하였다. 측정 장소는 250 m × 50 m로 주변에 건물은 없으며 개활지로 이루어져 있다.

5.1 절 실험 #1. 두 신호의 입사각이 같은 경우

예비실험을 통해 두 신호의 입사각이 같은 측정 구간에서 두 신호의 방향 추정을 통해 두 신호의 입사각이 같은 위치를 선정하고 이러한 지점에서 거리 추정 2를 통해 거리 추정이 되는지 여부를 확인하도록 하겠다.

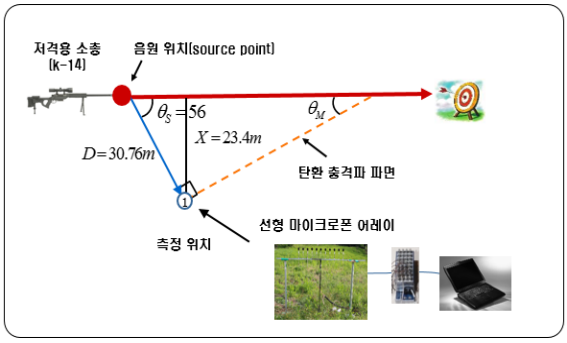


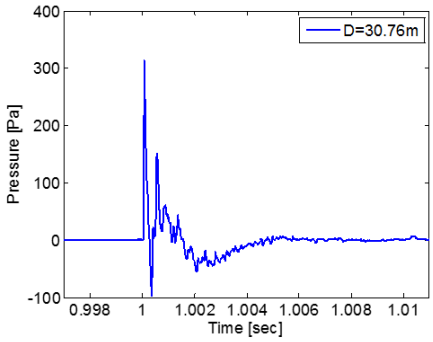
Fig. 14. Geometry of the measuring position

Fig. 14는 두 신호의 입사각이 같은 구간에서 측정 위치와 소총의 거리는 30.76 m이고 방위각은 56도임을 보여준다. 이러한 구간에서 11개 채널 등 간격 선형 어레이를 이용하여 방향 추정한 결과 총구 폭풍파의 방향과 탄환 충격파의 방향이 같음을 확인할 수 있다.

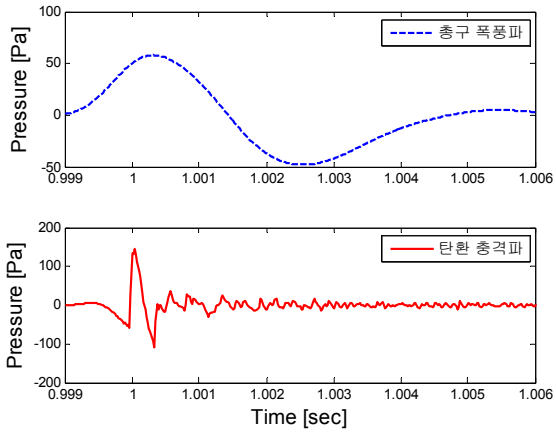
이때 마이크로폰 어레이 중심의 측정 신호는 Fig. 15와 같다. 이러한 중복 신호에서 두 신호 입사각이 같음으로 인해 거리추정방법 1이 성립하지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 거리추정방법 2를 통한 거리 추정을 하기 위해서는 먼저 탄환 충격파의 지속시간과 최대진폭 정보를 추출하기 위해 고역통과필터[차단주파수 800 Hz, 차수(100)]를 사용한다. 이렇게 추정된 탄환 충격파의 지속시간은 T = 273 ~ 293 μs이다. 그러나 최대진폭의 경우 두 신호의 중복으로 인해 오차가 발생하며 이러한 오차로 인해 거리 추정 시 실제거리 30.76 m에서 15 m로 거리 추정하는 결과를 가져온다.

탄환 충격파의 최대진폭에서 생기는 오차를 줄이기 위해 필터링된 탄환 충격파의 지속시간과 탄환 정보를 이용하여 최대진폭을 추정해야 한다. Whitham 근사식을 이용한 탄환 충격파의 최대진폭을 추정하기 위한 식은

$$P_{\max} = 3.2\frac{P_0 M^3}{c^3(M^2-1)} \cdot \frac{d}{l} \cdot \frac{1}{T^3} \qquad (20)$$



(a) overlap of the two signals



(b) separation of the two signals

Fig. 15. Measured signal

식 (20)과 같다. 이렇게 추정된 탄환 충격파의 최대진폭은 $P_{\max}$ = 84.5 ~ 104.5 Pa이다. 실제 거리는 30.76 m에서 5발 사격 평균 거리 추정한 결과는 30.75 m이고 실제 거리 대비 추정 거리 오차는 0.1 %, 표준 편차는 5 m이다.

5.2 절 실험 #2 두 신호의 입사각의 차가 13도일 경우

2번째 목적은 문턱값 이내에서 거리 추정 1보다 거리 추정 2의 거리 추정 오차가 더 작음을 확인하는 것이다.

Fig. 16은 두 신호의 입사각 차가 13도일 경우, 측정 위치와 소총의 거리는 31.7 m이고 방위각은 51도임을 보여준다. 이러한 구간에서 11개 채널 등 간격 선형 어레이를 이용하여 방향 추정한 결과 두 신호의 입사각 차가 13도임을 확인할 수 있다.

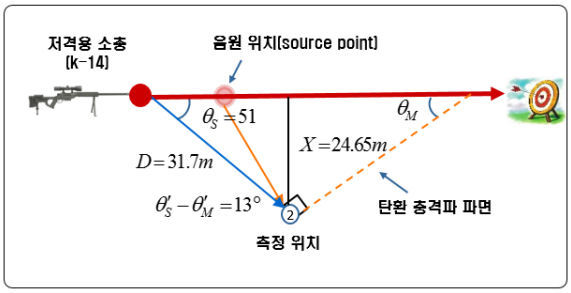
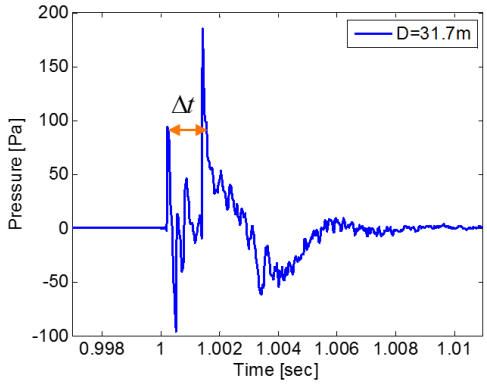
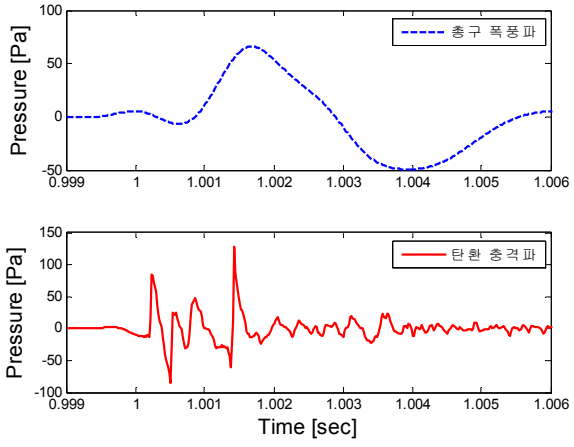


Fig. 16. Geometry of the measuring position



(a) overlap of the two signals



(b) separation of the two signals

Fig. 17. Measured signal

거리 추정 1로 거리 추정 결과 실제 거리 31.7 m에서 5발 사격 평균 거리는 20.3 m(표준편차 0.7 m)이고 거리 추정 오차는 36 %이다. 이때 두 신호의 도달 시간차는 Δt = 1.17 ~ 1.57 ms임을 확인하였다.

거리 추정 2는 두 신호가 분리 되어 관측되며 최대 진폭의 추정 없이 단순한 필터링한 결과 탄환 충격파의 지속시간은 T = 254 ~ 273 μs이고 최대 진폭은 $P_{\max}$ = 75.5 ~ 102 Pa이다. 실제 거리 31.7 m에서 5발 사격 평균 추정 거리는 30.2 m(표준편차 3.7 m)이고 거리 추정 오차는 5 %로 문턱값 이내에서 거리 추정 2가 더 정확한 거리 추정을 하는 것을 확인할 수 있다.

5.3 절 실험 #3: 두 신호의 입사각의 차가 18도일 경우

Fig. 18은 두 신호의 입사각 차가 18도일 경우, 측정 위치와 소총의 거리는 28 m이고 방위각은 44.5도임을 보여준다. 이러한 구간에서 11개 채널 등 간격 선형 어레이를 이용하여 방향 추정한 결과 두 신호의 입사각 차는 18도임을 확인할 수 있다.

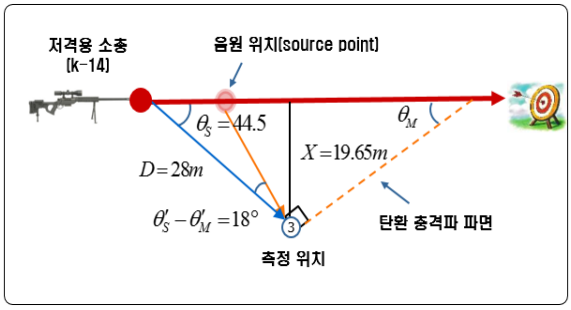
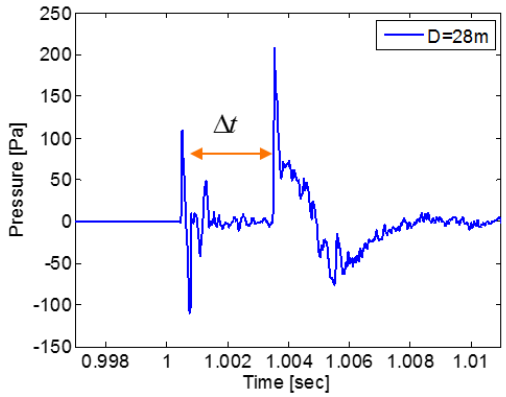


Fig. 18. Geometry of the measuring position

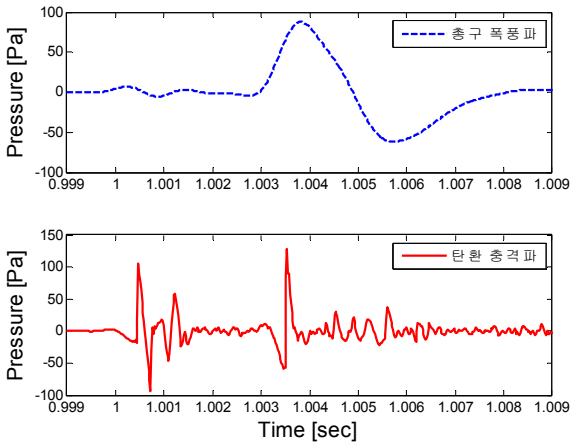
거리 추정 1로 거리 추정 결과 실제 거리 28 m에서 5발 사격 평균 거리는 24.4 m(표준편차 0.4 m)이고 거리 추정 오차는 13 %이다. 이때 두 신호의 도달 시간차는 Δt = 3.43 ~ 3.54 ms임을 확인하였다.

거리 추정 2로 확인 결과 두 신호가 분리 되어 관측되며 최대진폭의 추정 없이 필터링한 결과 실제 거리 28 m에서 5발 사격 평균 거리는 24.5 m(표준편차 0.6 m)이고 거리 추정 오차는 13 %로 2가지 거리 추정 방법의 거리 추정 오차가 같아짐을 확인하였다.

실험 1로 기존 거리 추정이 성립하지 않은 구간에서 거리 추정 2를 사용하여 거리를 추정하였다. 또한 실험 2와 3을 통해 4장에서 제시한 문턱값 이내에서 추정 2를 사용함으로써 거리 추정 오차를 감소할 수 있음을 증명하였다. 그러나 본 실험은 반사파가 없는 개활지에서 수행되었으며, 장애물에 대한 반사파를 제거하거나 분리하기 위한 연구는 추가적으로 필요하다.



(a) overlap of the two signals



(b) separation of the two signals

Fig. 19. Measured signal

6. 결 론

본 연구의 목적은 총소리를 이용하여 총구와 마이크로폰 어레이 중심 사이의 거리 추정 방법을 개선하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 기존 거리추정 원리를 알아보고 한계점인 두 신호의 입사각이 같을 경우 식이 성립하지 않는 것과 두 신호의 입사각 차가 작을수록 거리 추정 오차가 증가한다는 것을 확인하였다.

이러한 거리추정방법 1의 한계점을 해결하기 위해 탄도 수직거리 증가에 따른 탄환 충격파의 특징 변화를 이용한 거리추정방법 2을 제안하였으며 두 신호 입사각이 같은 구간에서 거리추정을 하였다. 또한 거리추정 1과 2의 실제 거리 대 추정 거리의 오차를 분석을 하여 문턱값을 선정하였으며, 이러한 문턱값 선정으로 인해 2가지 거리추정방법 중 거리추정 오차가 작은 거리 추정을 선택함으로써 거리추정 오차를 감소시켰다.

References

[1] ISO 17201-4:2006(en), [Acoustics — Noise from Shooting Ranges — Part 4: Prediction of Projectile Sound]

[2] Watters, B. G., “The(Sound of a Bursting) Red Balloon,” SOUNDS, Volume 2, Number 2, March-April 1963.

[3] J. Bedard and S. Pare, “Ferret: a Small Arms Fire Detection System: Localization Concepts,” Vol. 5071, No. 1, SPIE, pp. 497-509, 2003.

[4] DuMond, J. W. M., Cohen, E. R., Panofsky, W. K. H., and Deeds, E., “A Determination of the Wave Forms and Laws of Propagation and Dissipation of Ballistic Shock Waves,” The Journal of the Acoustical Society of America 18(1), pp. 97-118, 1946.

[5] G. B. Whitham, “The Flow Pattern of a Supersonic Projectile,” Commun. Pure Appl. Math. V, pp. 301-348, 1952.

[6] Snow, W. B, “Survey of Acoustic Characteristics of Bullet Shock Waves,” IEEE Trans. on Audio and Electromagnetics AU-15(4), pp. 161-176, 1967.

[7] Heung-Ju Lee, “Gun and Ballistics,” Cheong Moon Gak, p. 410, 2012.

[8] Maher, Robert C., and Steven R. Shaw, “Deciphering Gunshot Recordings,” Audio Engineering Society Conference: 33rd International Conference: Audio Forensics-Theory and Practice. Audio Engineering Society, 2008.