

소화기 발사음의 실시간 위치 추정 시스템에 관한 연구

A Study on Real Time Estimation System of Fire Sound Source Localization

노 창 수* **박 병 수*** **도 성 찬***
 Chang Su Roh Byung Su Park Sung Chan Do

Abstract

In this paper, the sound source localization system in real time which uses the time delay of arrival signal is proposed. This system uses minimum microphones and surveillance camera for estimation of the sound source localization and sound direction. To apply this system to the military field, four models(model1~model4) are derived. Model 1 can be used to evaluate the sound source localization at the long distance. Model2 and model3 can be applied to estimate the sound direction. Model4 is useful for the special purpose and potable device. It is possible for this system to be used for the military guard and surveillance. As a result of experiments, It is shown that this system can estimate the sound source localization and the sound direction using minimum microphones.

Keywords : Sound Source Localization(음원 위치), Cross-Correlation(상호상관함수), TDOA : Time Delay Of Arrival(도달시간지연), Surveillance Camera(감시카메라)

1. 서론

3차원 공간상의 음원위치를 추정(Estimation of Sound Source Localization)하기 위하여, 수학적 접근은 1975년에 테일러급수(Taylor Series)를 활용한 위치추정^[1]과 도달시간지연(TDOA : Time Delay Of Arrival)에 의한 쌍곡선의 교점^[3]으로 추정한다. 그리고 3차원 공간상에서 음원위치를 파악하기 위해서는 3방향으로 3개씩 총 9개의 마이크로폰이 필요하나, 이중 중복으로 사용 가능한 원점방향 2개를 제외하면 7개 이상이 필요하다.

현재 미국에서는 7개의 마이크로폰을 장착한 시스템을 차량에 탑재하여 실제 전투 현장에 투입하고 있으며 마이크로폰 어레이를 이용한 음원위치 추정이 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 음원 추정의 새로운 이론적인 제시는 없다. 그러나 1km 이내의 유효사거리에서 발사되는 소화기의 발사음의 위치추정을 위하여 상황에 적합한 접근방법을 제안하며 소화기 발사음의 실시간으로 추정할 수 있는 방법과 시스템을 제시한다.

군의 작전 및 전시에 대비해야 함으로 다음의 조건을 고려한다.

† 2009년 7월 17일 접수~2009년 10월 9일 게재승인
 * 대도기술연구소(DAEDO Technology Research Institute)
 책임저자 : 노창수(bestnara7@paran.com)

- 단순화된 알고리즘 적용으로 실시간 음원위치 추정
- 이동/은폐성을 고려한 조립 가능한 시스템

- 군의 특수성에 적합한 응용모델 개발

군 작전 상황에 따라, 음원의 위치를 추정할 장치를 크게 4가지 모델 즉 1)원거리용 모델 2)경계감시용 모델 3)휴대용 모델 4)특수목적용 모델 등을 제안한다. 이렇게 제안된 모델은 LabVIEW를 기반으로 하고 최소한의 마이크론을 사용한다.

본 논문에서는 2~4개의 마이크론을 이용하여 실시간으로 음원의 위치를 추정해야 하기에 인간의 시각(Human Visual System)과 인지 능력의 도움을 받으며 영상정보와 지형데이터를 활용하는 독창적인 모델을 고안하여 군의 특수성에 적합하도록 개발한다.

2. 음원의 위치 추정기법

가. 테일러 급수를 이용한 음원 위치 추정^(1,4)

Fig. 1에서와 같이, 3차원 공간상에 음원이 있고 다수의 마이크론이 배치되어 있을 때, 거리의 차 d_{ij} 는 식 (1)과 같이 표현되며 TDOA는 식 (2)와 같다.

$$d_{ij} = r_i - r_j = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2 + (z-z_j)^2} \quad (1)$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{c_0} \quad (c_0 : \text{음속}) \quad (2)$$

여기서,

음원의 위치 : (x, y, z)

각 마이크론의 위치 : $(x_i, y_i, z_i) (i = 1, 2, \dots, n)$

마이크론에서 음원까지의 거리 : r_i

두 마이크론 사이의 TDOA : τ_{ij}

식 (1)과 (2)의 관계로 부터 식 (3)을 구성할 수 있다.

$$f_a(x, y, z, x_i, y_i, z_i, x_j, y_j, z_j) = c_0 \tau_{ij} \quad (3)$$

where, $a = 1, 2, \dots, n$

음원의 초기 위치값 (x_v, y_v, z_v) 을 식 (4)와 같이 가정 한 뒤 2차항 이하의 테일러 급수로 선형화하여 나타 내면 식 (5)와 같다^[1].

$$x = x_v + \delta_x, y = y_v + \delta_y, z = z_v + \delta_z \quad (4)$$

$$\delta = [A^T A]^{-1} A^T Q \quad (5)$$

n 개의 마이크론을 이용할 경우, 식 (3)은 $n(n-1)/2$ 개의 독립방정식이 얻어지며 최소자승법(LSM : Least-Squares Method)을 적용하여 오차가 최소가 되도록 δ 을 반복수행하여 음원의 위치를 찾는다. 그러나 적당한 n 이 필요하며 정확한 해가 항상 구해진다고 보장 할 수는 없다. 이는 Fig. 7에서 두 쌍곡선의 교합 부위가 점 혹은 직선이 아닌 임의의 곡선으로 나타나기 에 해를 구하기 쉽지 않음을 알 수 있다.

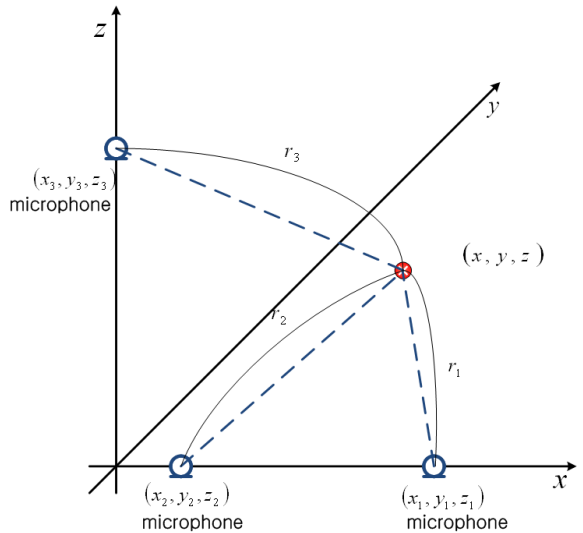


Fig. 1. 거리차를 이용한 측정법

나. 쌍곡선을 이용한 음원 위치 추정

Fig. 2와 같이 한 평면상에 음원 발생 시 두 센서 $(c, -c)$ 에 도달하는 시간차(TDOA)를 거리로 환산하여 궤적으로 나타내면 쌍곡선 방정식이 된다.

음원으로부터 센서에 도달하는 시간차는 식 (6)과 같이 상호상관함수를 이용하여 시간차를 구하고 거리로 환산한다.

$$R_{xy}[\tau] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N x[n]y[n+\tau] \quad (6)$$

한 평면상에서 3개의 센서를 사용하면 Fig. 3과 같이 음원에 대한 궤적의 교점으로 음원의 위치를 정확

히 추정할 수 있다. 즉, m_1 과 m_2 에 의한 음원 위치 궤적과 m_2 와 m_3 에 의한 음원 위치 궤적의 교점은 음원이 실제로 발생한 위치가 된다.

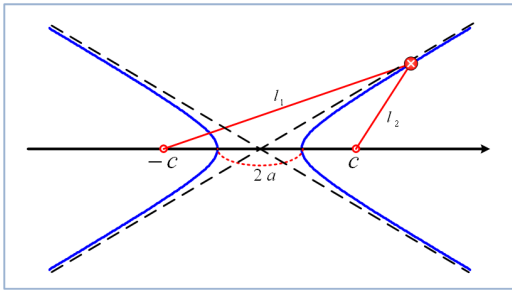
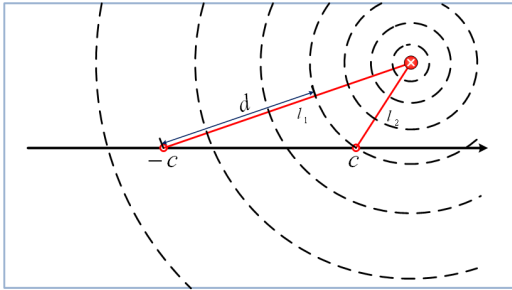


Fig. 2. 쌍곡선을 이용한 음원의 위치 추정법

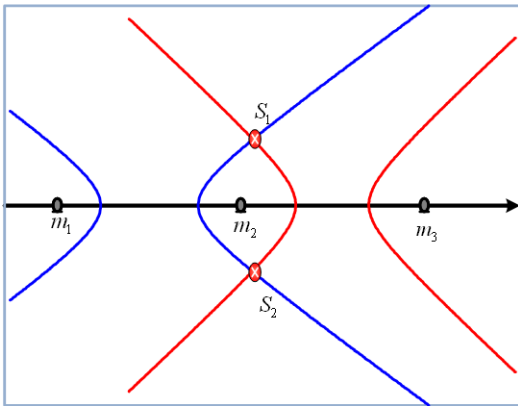


Fig. 3. 한 평면상에서 3개의 센서를 이용한 음원 위치 추정

Fig. 4는 한 평면상에서 실제 음원으로부터 서로 다른 도착 시간차에 의한 거리차 궤적을 보여준다. 그 결과 센서의 전방 1m 이상의 거리에서는 궤적이 선형적 특성을 가짐을 확인하였다.

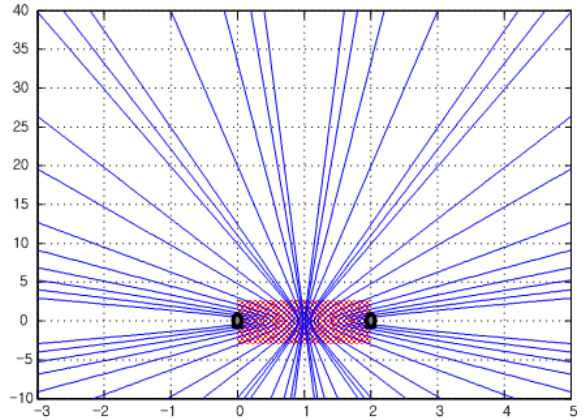


Fig. 4. 음원의 거리차에 대한 궤적

이러한 특징을 이용하여 제한한 모델의 음원 방위 각 설정은 Fig. 5와 같이 x 축과 점근선이 이루는 각 (θ)을 이용한다.

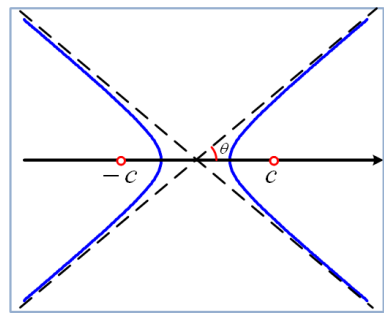


Fig. 5. 쌍곡선의 점근선

다. 위치 추정 3D 모델링

실제 음원의 위치는 3차원 공간상에 있다. 그러므로 이를 추정하기 위해 Fig. 2와 3을 참고 하여 3D 공간상의 음원의 궤적을 표현하면 Fig. 6과 같다.

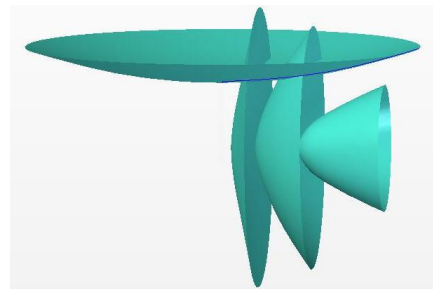


Fig. 6. 쌍곡선 궤적의 3D 디스플레이

두 쌍곡선면의 교합 부위는 Fig. 7과 같이 임의의 곡선으로 나타난다.

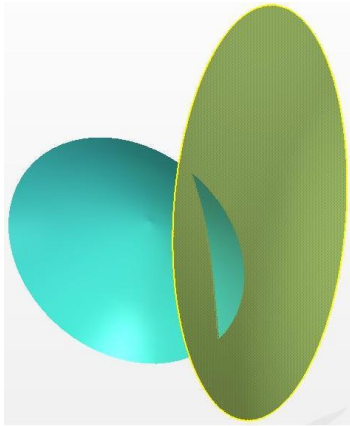


Fig. 7. 두 쌍곡선의 교합 부위

라. 지형 데이터를 활용한 음원 위치 추정

실제 공간상에서 음원의 위치에 대한 평면이 결정되면 즉 TDOA가 영이 되면 음원 위치 추정 방법이 단순화 된다. 또한 해당 쌍곡선면을 안다면 위치 추정이 수월해 진다. 그러므로 지형데이터를 활용하면 주요 지형데이터와 해당 쌍곡선면의 수렴 관계를 알 수 있으므로 예상 음원 위치의 순위를 정할 수 있고 경우의 수를 줄여 추정의 정확도를 향상 시킬 수 있다. 단, 시가전일 경우는 빌딩들이 있어 이의 적용은 어렵다. 그러나 고정된 지역의 경계감시는 지형데이터를 이용하여 음원의 위치 추정을 확대 적용할 수 있으며, 제시된 모델, 즉 모델 2와 3과 같이 감시카메라를 활용하여 음원이 추정된 위치로 회전하고 zoom하여, 영상으로 음원의 영역을 기록한다면 이는 경계 근무에 활용할 수 있으며 기록된 데이터로 분석도 가능하다.

3. 개발 모델

주변 환경과 용도에 따라 고려해야 될 변수가 많아 개발 모델을 원거리용, 경계근무용, 그리고 휴대용으로 분류하였고 경계감시 및 DB를 위해 감시카메라를 추가하였다.

본 논문에서는 군의 특성상 적합한 응용모델 4가지를 다음과 같이 제한한다. 각 모델별 시스템 블록다이어그램은 Fig. 8과 같다.

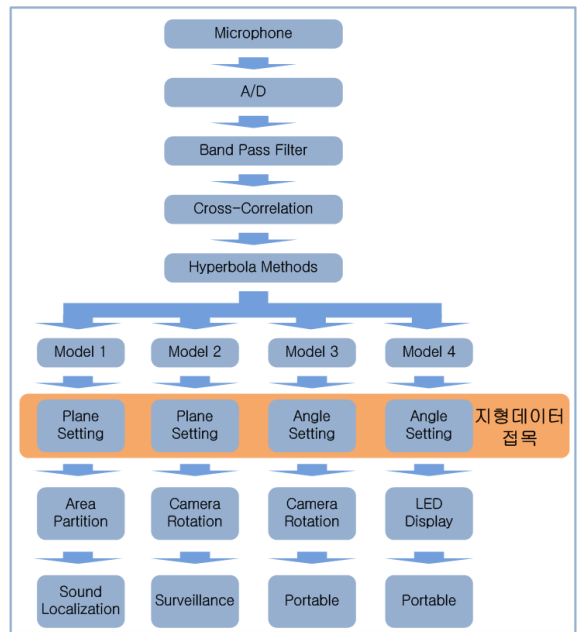


Fig. 8. 시스템 블록다이어그램

가. 모델 1: 4개의 마이크로폰

모델 1의 시스템 구성은 Fig. 9와 같다. 원점과 z축에 있는 두 개의 마이크로폰은 음원의 상하 쌍곡선면을 결정한다. 이렇게 결정된 쌍곡선면에서 x축의 3개의 마이크로폰은 음원의 위치를 결정하게 된다. 앞에서 기술한 바와 같이 TDOA가 영이 되도록 상하회전을 하면 쌍곡선면이 아닌 평면상에서 위치추정을 하게 되어 단순하고 정확한 음원 위치를 추정할 수 있다.

이 모델은 원거리의 음원 추정이 가능하고 장갑차에 장착할 수 있다.

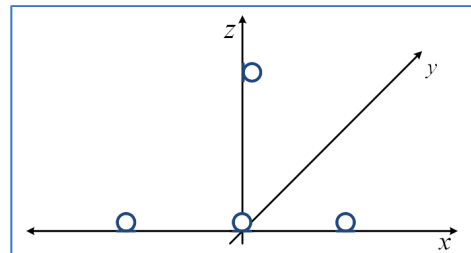


Fig. 9. 모델 1: 4개의 마이크로폰

나. 모델 2: 3개의 마이크로폰과 감시카메라

모델 2는 Fig. 10과 같이 3개의 마이크로폰과 감시카메라가 장착된다. z축 방향의 2개의 마이크로폰은

음원의 상하 위치에 대한 쌍곡선면을 결정하게 되고, 이렇게 결정된 쌍곡선면상에서 x 축에 있는 2개의 마이크로폰이 음원의 궤적을 추정하게 된다. 이렇게 추정된 궤적은 감시카메라가 회전하여 음원이 발생한 지역을 실시간으로 촬영-저장-통보하게 된다.

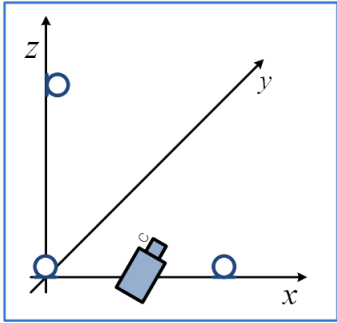


Fig. 10. 모델 2: 3개의 마이크로폰과 감시카메라

다. 모델 3: 2개의 마이크로폰과 감시카메라

모델 3은 Fig. 11의 위 그림과 같이 2개의 마이크로폰과 1개의 감시카메라로 구성된다. 최소한의 장치를 활용하여 음원의 궤적을 추정 및 감시가 가능하며 또한 기동성이 뛰어나다. 2개의 마이크로폰으로부터 취득된 신호로 음원의 궤적을 추정하게 된다. 이렇게 추정된 궤적의 점근선 방정식을 이용하여 음원의 방위각을 추정하게 되고 추정된 방위각을 이용하여 Fig. 11의 아래 그림과 같이 카메라의 회전으로 음원의 발생 위치를 촬영하게 된다.

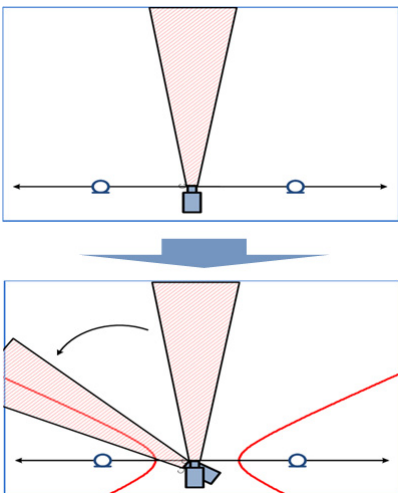


Fig. 11. 모델 3 동작 원리

라. 모델 4: 2개의 마이크로폰과 LED Display

Fig. 12와 같이 모델 4는 2개의 마이크로폰과 LED 어레이로 구성되어 있다. 2개의 마이크로폰을 이용하여 음원의 궤적을 추정하게 되며, 추정된 궤적을 이용하여 음원의 방위각을 산출하게 된다. 이렇게 산출된 방위각은 LED를 이용하여 디스플레이 한다.

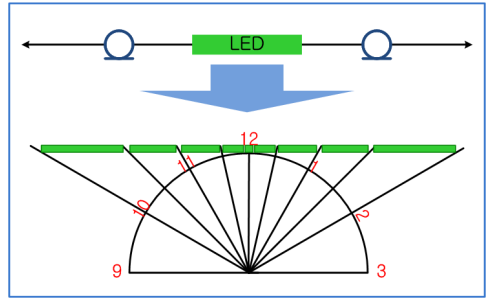


Fig. 12. 모델 4: 2개의 마이크로폰과 LED Display

모델 4는 Fig. 13과 14와 같이 전투헬멧 및 개인화기에 장착함으로써 전투력을 증진시킬 수 있다.

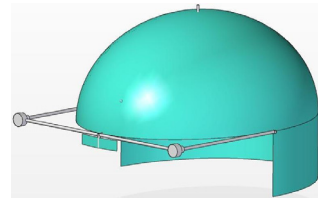


Fig. 13. 전투헬멧 장착용

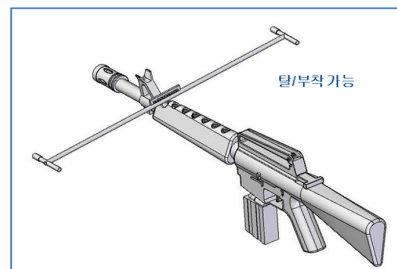


Fig. 14. 개인화기 장착용 음원 위치 추정시스템

4. 실험 결과

가. 실험 환경

음원 추정에 사용한 노트북과 기기는 다음과 같다.

- LabVIEW 8.6
- 마이크론 : AKG(C 1000S)
- NI-9234 : 4 Channel Data 수집 Kit
- NI USB-9162 : 유/무선 Hi-Speed USB Carrier
- Web Cam

실험 장소는 가로 8미터 세로 10미터 인 건물 옥상 (Fig. 15)에서 실험하였고, 마이크론 간격은 1m로 설정하였다. 또한, 장거리에 대한 실험 결과를 검증하기 위하여 축구운동장(Fig. 16)에서 최대 100미터까지 실험하였다.

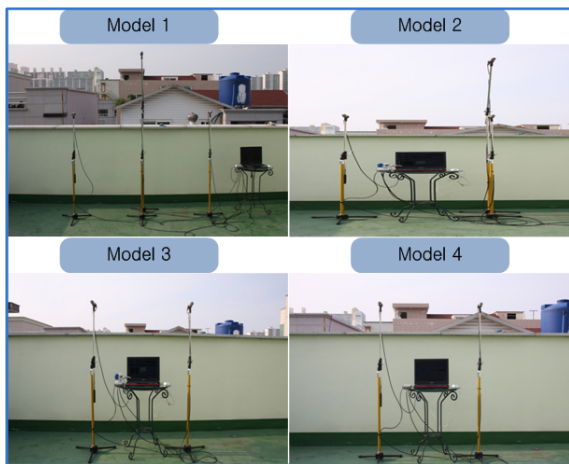


Fig. 15. 옥상에서 모델별 실험



Fig. 16. 축구운동장에서 실험

나. 실시간 모니터링

Fig. 17은 LabVIEW로 프로그래밍 한 입력창이다. 마이크론 간격(1m)과 현재 온도(26℃) 그리고 샘플링 주파수 등을 입력한다.



Fig. 17. 입력창

모델 1~4의 실시간 모니터 화면은 Fig. 18과 같다.

Fig. 17 (a) 모델 1의 화면은 Fig. 9와 같이 마이크론 4개를 이용하여 음원의 위치를 실시간 추정하는 프로그램으로 LabVIEW를 기반으로 한다. 상하 마이크론으로 음원의 평면이 결정되고 결정된 평면 내에서 3개의 마이크론을 이용하여 음원의 위치를 그림 왼쪽 아래와 같이 접근선의 교점으로 나타낸다. 또한 음원의 추정된 위치를 그림 오른쪽 아래에 영역 분할하여 LED로 표시된다.

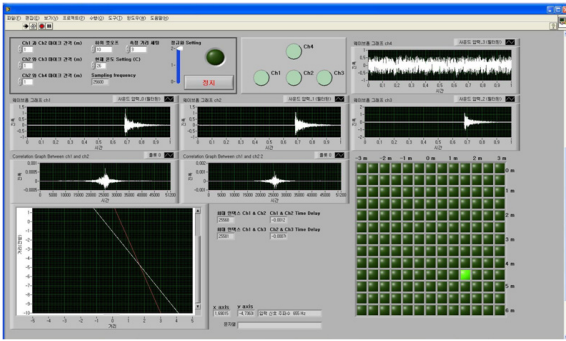
모델 2의 화면 즉 Fig. 18 (b)는 3개의 마이크론과 감시카메라(Fig. 10)를 이용하여 음원의 방위각을 추정한다. 상하 마이크론에 입력된 신호로 음원의 상·하 평면이 결정되고 결정된 평면 내에서 음원의 방위각을 추정하고 추정된 방위각으로 카메라를 회전한다.

모델 3의 화면은 2개의 마이크론과 1개의 감시카메라(Fig. 11)를 이용하여 음원의 방위각을 추정하고, 추정된 방위각으로 카메라가 회전하는 시스템이다. 그림 왼쪽 아래에 쌍곡선의 궤적이 그려지며 음원은 이 궤적 방향에 있으며 카메라로 줌인하여 음원정보를 취득한다.

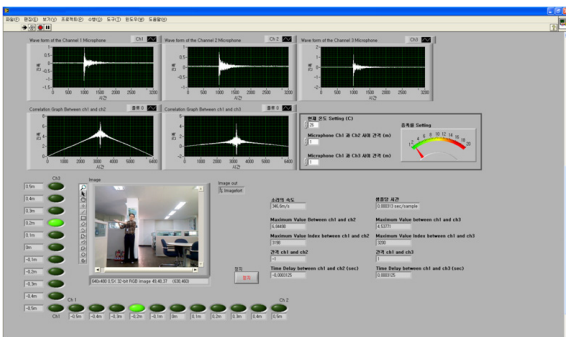
모델 4의 화면은 2개의 마이크론을 이용하여 음원의 방위각을 추정하여 방위각 정보를 LED(Fig. 12)로 표시하는 시스템이다.

다. 음원 위치에 대한 실험

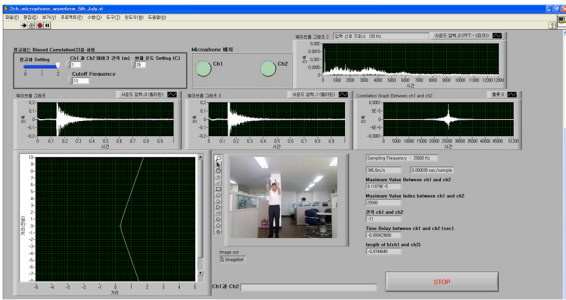
Fig. 15와 같이, 수평면상에 3개의 마이크론을 설치하여 음원의 위치 추정을 실험한 결과는 Fig. 19와 같다. 실제 음원을 발생시킨 위치는 거리측정 등의 오차가 발생 가능함으로 실험 결과들을 이용하여 MSE를 구하여 Table 1에 나타내었다.



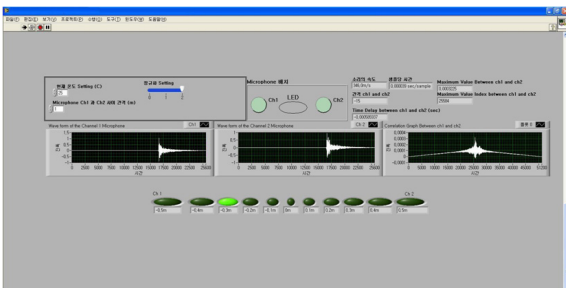
(a) 모델 1



(b) 모델 2



(c) 모델 3



(d) 모델 4

Fig. 18. 각 모델별 구현

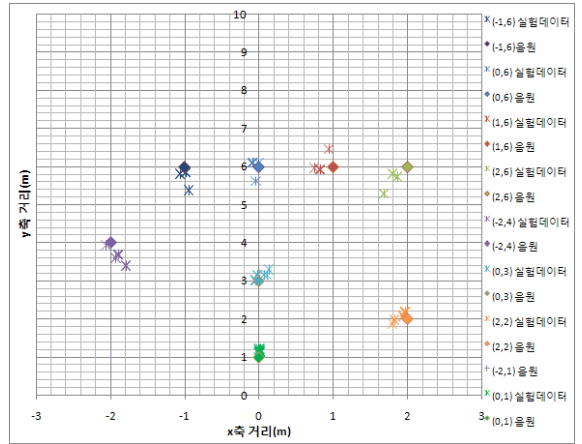


Fig. 19. 음원 위치 추정 실험 결과

Table 1. 음원 위치 추정 실험 결과

음원 발생 위치(m)	MSE (Mean Square Error)
(-1, 6)	0.2432
(0, 6)	0.1383
(1, 6)	0.2259
(2, 6)	0.4804
(-2, 4)	0.3980
(0, 3)	0.1095
(2, 2)	0.1531
(-2, 1)	0.2179
(0, 1)	0.1409

실제 음원의 발생 위치 (x, y) 좌표와 실험결과 산출된 (x', y') 좌표를 이용하여 발생위치와 실험결과의 거리차는 식 (7)과 같다.

$$d = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \quad (i = 1, \dots, N) \quad (7)$$

이렇게 실험 횟수 N 에 대해 평균오차제곱(MSE : Mean Square Error)를 식 (8)을 이용하여 구하였다.

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (8)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{d} - d_i)^2$$

실험결과 음원의 위치 추정에 대한 결과를 이용하여 MSE를 얻은 결과 낮은 Error를 보였다. 따라서 거의 높은 정확도로 음원의 위치를 추정함을 알 수 있다.

라. 음원의 방위각 실험

2개의 마이크를 이용하여 측정된 도달지연 시간을 이용하여 음원의 방위각 추정에 대한 실험 결과는 Table 2와 같다. 각 음원 발생위치에서 측정된 결과들을 이용하여 MSE로 나타내었다.

Table 2. 음원 방위각에 대한 실험 결과

실험 음원 발생 위치(m)	MSE (Mean Square Error)
(-1, 1)	0.1747
(-2, 4)	0.2981
(-1, 2)	0.1832
(-2, 6)	0.3567
(2, 6)	0.3460
(3, 6)	0.1568
(0, 2)	0.2423
(0, 6)	0.1411

5. 고 찰

본 논문에서 제안한 모델 1~4의 실시간 음원추정을 위하여 LabVIEW 기반으로 프로그래밍 하여 실시간 모니터링(Fig. 18)하고 Fig. 15와 같이 실험하여 Table 1과 2의 결과를 얻었다. 실험 결과에 대한 MSE를 구하여 본 결과 낮은 Error를 보여 음원의 위치 및 방위각 추정에 있어 높은 정확도를 갖고 있다고 할 수 있다. 그러나 10미터 이내에서 실험한 결과이기에 Fig. 16과 같이 측구장에서 100미터까지, 마이크론 간격을 1미터(Fig. 16의 오른쪽)로 하여 음원 위치 추정이 가능한지를 검증하였다. 또한 마이크론 간격을 25cm(Fig. 16의 왼쪽)로 줄여서 방위각 추정을 실험한 결과 음원의 방향 판별이 가능하였다. 이는 전투 헬멧(Fig. 13)에 장착 가능한 간격이다. Fig. 16과 같이 박수로 소리를 내어 위와 같은 결과를 얻었으므로 소화

기 발사음일 경우는 더욱 먼 거리에서도 음원추정이 가능하리라고 판단되며 실제 군에서 이를 실험해 볼 가치가 충분히 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 다수의 마이크가 아닌 소수의 마이크를 이용한 LabVIEW 기반의 실시간 음원 위치 추정 시스템을 개발하였다.

음원 시간 지연은 상호상관함수를 이용하고 음원 위치는 쌍곡선면을 고려하여 추정하였으며 궤적을 단순화하였다. 또한 군의 특수성을 고려하여 상황별 4가지 모델을 제안하였다.

마이크로폰과 감시카메라를 이용하여 실시간으로 음원의 방향을 촬영-저장-통보하게 되면 군의 경계/감시 장치로도 활용이 가능하다고 본다.

개발한 모델 1~4를 이용한 실시간 음원추정 능력은 실험결과를 MSE로 비교하여 본 결과 낮은 Error로 높은 정확도를 보였다.

향후 시스템에 지형데이터와 3D 기법을 활용하여 좀더 정확한 음원의 위치추정 시스템을 개발할 예정이다. 또한, 특정한 음에 대한 필터설계를 통해 상황에 따라 중요 음원에 대한 위치 추정이 가능하도록 할 것이다.

Reference

[1] WADE H. FCarter, "Position-Location Solutions by Tayler-Series Estimation", IEEE Trans. Aerospace and Electronic System, Vol. AES-12, No. 2, March 1978.

[2] 김용은, 조수현, 정진균, "영역 분할을 이용한 효율적인 음원 위치 추정 시스템", 대한전자공학회, 전자공학회논문지, 제46권 SP편 제2호, pp. 114~119, 2009.

[3] 전승환, 채양범, "선박기적음의 위치검출에 관한 기초연구", 해사산업연구소논문집, 제7집, pp. 151~158, 1998.

[4] 이종현, 이재형, 이욱, 최종수, "회전하는 소음원의 위치추적에 대한 TDOA기법의 적용", 한국소음진동학회, 춘계학술대회논문집, pp. 483~489, 2009.