

음선 추적을 이용한 폭발음 위치추정 오차 보정에 대한 연구

Study on Error Correction of Impact Sound Position Estimation Using Ray Tracing

최 동 훈* · 고 영 주* · 이 재 형* · 나 태 흠** · 최 종 수†
 Donghun Choi, Yeong-Ju Go, Jaehyung Lee, Taeheum Na and Jong-Soo Choi

(Received November 26, 2015 ; Revised January 14, 2016 ; Accepted January 20, 2016)

Key Words : Time Difference of Arrival(도달지연시간), Source Positioning(소음원 위치파악), Position Estimation Error(위치추정오차), Wind Effect(바람 영향), Ray Tracing(음선추적)

ABSTRACT

TDOA(time delay of arrival) position estimate from acoustic measurement of artillery shell impact is studied in order to develop a targeting evaluation system. Impact position is calculated from the intersections of hyperbolic estimates based on the least square Taylor series method. The mathematical process of Taylor series estimation is known to be robust. However, the concern lays with the accuracy because it is sensitive to the bias caused by the randomness of measurement situation. The measurement error typically occurs from the distortion of waveform, change of travelling path, and sensor position error. For outdoor measurement, a consideration should be made on the atmospheric condition such as temperature and wind which can possibly change the trajectories of rays of sound. It produces wrong propagation time events accordingly. Ray tracing and optimization techniques are introduced in this study to minimize the bias induced by the ray of sound. The numerical simulation shows that the atmospheric correction improves the estimation accuracy.

기 호 설 명

α : 음선 입사각[deg]
 β : 바람에 의해 영향을 받은 음선 입사각 [deg]
 \vec{c} : 음속 벡터[m/s]
 c_1, c_2 : 매질1, 2에서의 음속
 \vec{c}_w : 바람에 의해 영향을 받은 음속 벡터 [m/s]

τ_{ij} : 소음원부터 센서 i 와 센서 j 의 도달 시간의 차
 d_{ij} : 센서 i 와 센서 j 의 소음원까지 거리들의 차
 n : 센서 수
 \vec{w} : 바람 벡터
 w_1, w_2 : 매질1, 2에서의 풍속
 $TDOA_m$: 초기 측정 $TDOA$
 $TDOA_r$: 음선추적을 이용하여 계산한 $TDOA$

† Corresponding Author ; Member, Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University
 E-mail : jchoi@cnu.ac.kr

* Member, Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University

** Member, Agency for Defense Development

‡ Recommended by Editor Hung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

1. 서 론

이 논문에서는 무기체계 개발과정 중 음향센서를 이용하여 측정된 포탄의 폭발음에 대한 정보로부터 포탄의 탄착점 및 폭발 위치를 추정하는 연구를 소개한다. 해상 시험 환경에서 포탄 성능 평가가 수행될 때 다수의 음향 부이(buoy)를 해상에 띄워 폭발 순간의 음파를 측정하는 시스템 개발에 대한 연구가 진행 중이다⁽¹⁾. 일반적인 음향 부이는 수중 운동체의 위치 측정 및 교신을 위해 개발된 장비로서 무인 잠수정 조정과 수중탐색을 지원하는 시스템으로 개발되어 왔다^(2,3). 음향 부이는 GPS 신호를 이용하여 실시간으로 자체 위치를 확인할 수 있으며 하이드روفोन으로 수중 통신과 음파 측정이 가능하다. 근래에는 Fig. 1과 같이 포탄 및 유도무기의 목표물 타격 정밀도를 평가하는 시스템으로 개발되어 무기체계 평가 분야에 응용되고 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 유도무기는 자체 위치를 측정할 수 있는 센서장치가 가능하나 포탄의 경우 탄착지에서의 임팩트 소음을 이용한 방법이 가능하다. 해상에 분포된 음향 부이에서 측정된 소음 신호를 기반으로 한 TDOA 기법을 적용하여 포탄의 임팩트 위치를 추정할 수 있다.

음향센서 어레이를 이용한 소음 측정 시 소음원에서 발생한 음압신호는 측정 센서의 위치에 따라 각각 서로 다른 시각에 수집된다. 각 센서에 도달한 신호의 위상은 동기화 된 GPS 시간 정보로 보정되고, 센서 간 발생하는 시간 차를 계산하여 도달지연 시간을 구한다. 두 센서 간의 TDOA를 기하학적 거리로 계산하면 쌍곡선으로 표현되며, 다른 센서 쌍

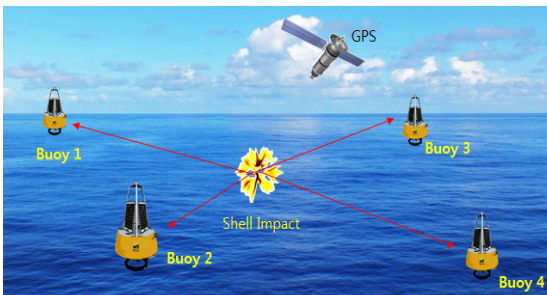


Fig. 1 Concept of GPS-based acoustic buoy deployed in the ocean while measuring impact sound of shell

에서 계산한 쌍곡선들과의 교점으로부터 소음원의 위치를 추정하는 것이 TDOA 기법이다. 센서 간의 도달지연시간은 비선형화된 식으로 표현이 되며 테일러 급수를 통해 선형화하여 계산한다⁽⁷⁾.

TDOA 기법은 오랜 시간 동안 국내외에서 GPS를 기반으로 한 항로 추적과 모바일 기기 등과 관련하여 많은 연구가 소개되어 왔다. 전파나 음파를 측정하는 센서의 위치와 신호 수신 시각을 기반으로 TDOA를 측정하면 발신자의 위치는 기하학적 문제로 표현되며 이를 풀기 위한 다양한 수식적 접근이 이뤄졌다⁽⁸⁻¹¹⁾.

음향 분야에서 TDOA 기법을 이용하여 소음원 위치를 추정하는 경우, 측정 오차에 의해 추정 정확도에 주는 영향을 극복할 필요가 있다⁽¹²⁾. 관련 연구는 움직이거나 회전하는 음원을 위치 추적을 위해 센서 어레이를 이용한 연구도 국내에 소개된 바 있다. 특정 형태로 움직이는 소음원의 경우 TDOA 패턴이 발생하는 것을 관찰할 수 있다⁽¹³⁾. TDOA 측정오차가 발생하는 것을 양상률 평균을 적용하거나 필터를 적용할 필요가 있다. TDOA 측정값 정확도를 향상시키고 시뮬레이션과 실험을 통해 서로 다른 주파수를 갖는 회전 음원의 위치 추적 가능성과 추적 성능을 검증하였다.

높이 오차를 고려하여 테일러 급수 설계 방법을 하는 연구에서는 센서의 높이가 일정한 평면상에서 소음원의 위치추정 값의 오차를 테일러 급수의 높이 계산을 수정을 시켜 모의실험에서 높이 추정값이 개선이 된 것을 확인할 수 있다⁽¹⁴⁾. 3차원 TDOA 위치인식 시스템의 마이크 센서 배열 최적 설계를 하는 연구에서는 센서의 개수와 배열 위치에 따라 추정 위치의 오차 특성을 DOP로 분석하여 오차 패턴과 오차값을 고려하여 마이크 배열을 제안하였다⁽¹⁵⁾.

이 연구는 포탄의 임팩트 소음을 모사한 펄스 신호를 마이크로폰 어레이로 측정하여 임팩트 위치를 추정하기 위해 TDOA 기법을 응용하였다. 그리고 야외에서 소음을 측정하여 소음원 위치를 추정하는 과정에서 대기 조건이 TDOA 위치 추정 정확도에 미치는 영향을 분석하고 보완 방법을 제안한다. 야외에서 음향 측정 시 대기 조건 및 주변 환경에 의해 음파 전달 경로가 직선으로 진행하지 않고 굴절될 수 있으며 이로 인해 직선 전파 시간이 아닐 수 있다^(16,17). 음선추적방법과 최적화 기법을 이용하여

TDOA 기법 추정값을 보정하는 방법을 소개한다. 야외에서 TDOA 기법을 사용할 경우, 대기환경(바람, 온도)이 전파 속도와 진행 거리 및 방향에 영향을 주기 때문에 음파가 센서에 도달할 때 측정오차가 발생하게 되며 TDOA 위치 추정 정확도에 영향을 미치게 된다. 이러한 이유로 대기환경을 고려한 TDOA 기법의 추정값을 보정할 수 있는 알고리즘을 소개한다.

2. TDOA를 이용한 위치추정

직교좌표계에서 소음원의 실제 위치를 (x, y, z) , 측정 위치를 (x_i, y_i, z_i) 로 정의하고 소음원과 각 측정 지점까지의 거리를 r_i 로 나타내면, 센서 i 와 센서 j 의 소음원까지 거리들의 차 d_{ij} 는 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

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

도달지연시간 τ_{ij} 은 음속 c 으로 음파가 전파된 거리를 간 시간이므로

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{c} \tag{2}$$

n 개의 측정 센서로 구성된 어레이 측정값에서 $n(n-1)/2$ 개의 τ_{ij} 를 계산할 수 있다. 이렇게 얻어지는 도달지연시간의 관계는 비선형 연립방정식의 형태로 정리되며, 테일러 급수를 이용하여 선형화하여 구한 해로 소음원의 위치를 추정할 수 있다. 이 과정에서 최소자승법을 이용하여 테일러 급수 오차가 최소가 되는 위치가 추정값이 되며, 소음원 위치의 초기 가정값과 추정값과의 오차가 수렴할 때까지 반복하여 계산을 수행하며 추정값을 결정한다.

3. 대기환경을 고려한 TDOA 오차 보정

3.1 온도 영향에 대한 고찰

온도의 구배가 있다면 음파경로가 바뀌게 되며 음파는 낮은 음속의 방향으로 굴절하므로 음파경로

가 기하학적 최단경로와 다르기 때문에 측정된 도달 지연시간에 오차가 발생한다. 음속은 온도분포에 따라 식(3)과 같이 변화하는 것으로 알려져 있으나⁽¹⁶⁾, 이 연구에서는 수면 위 온도분포를 일정하다고 가정하여 무시하였다.

$$c = 20.05 \sqrt{(T + e/p)} \text{ [m/s]} \tag{3}$$

3.2 바람 영향에 대한 고찰

바람에 따라 음선 방향이 변하며, 바람이 없는 경우 음선은 직진하고 바람이 있으면 바람 방향으로 음선이 굴절한다. 소음을 측정하는 필드 내 풍속, 풍향의 분포에 따라 음선의 굴절각이 영향을 받으며, 음파의 실제 경로와 기하학적 최단경로가 차이가

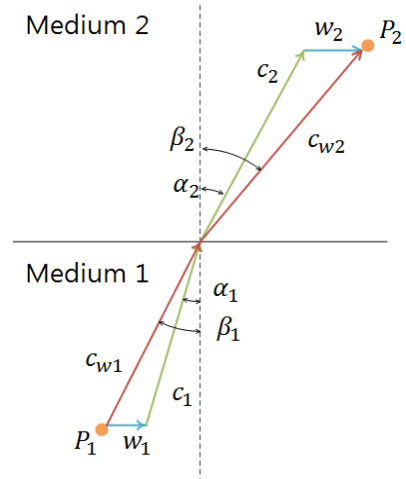


Fig. 2 Ray propagation geometry between two media

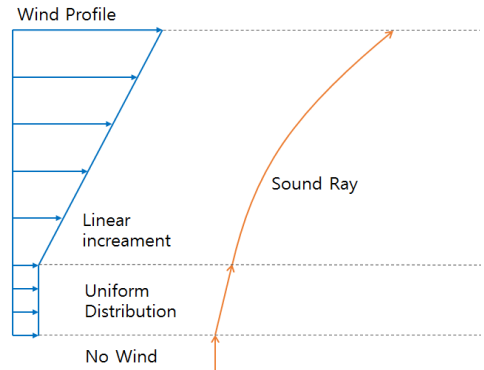


Fig. 3 Sound ray effected by wind

발생한다⁽¹⁶⁾. 음선추적 방법을 적용하기 위해 식 (4) 과 같이 음선 벡터 \vec{c} 와 바람 벡터 \vec{w} 의 합을 음파 진행방향으로 계산한다. 대기에서 진행되는 음파는 매질인 공기의 움직임과 함께 이동한다고 가정한다.

$$\vec{c} = \vec{c} + \vec{w} \tag{4}$$

다른 풍속의 영역을 음파가 통과할 때 음선이 최 단경로를 따라 이동하는 페르마의 정리에 의해서 굴절되는 음선의 기하학적 형태가 Fig. 2에 보이고 있다. 두 매질의 음속이 다르고 풍속이 다를 때 P_1 에서 전파되는 음파가 P_2 에 전달되는 경로를 설명하고 있다. 각 격자 사이에서 음파의 방향은 식 (5)와 같다⁽¹⁷⁾.

$$\frac{c_{w1}}{\sin \beta_1} + w_1 = \frac{c_{w2}}{\sin \beta_2} + w_2 \tag{5}$$

Fig. 3은 음파가 바람이 부는 공간을 지나갈 때 음선의 굴절이 발생하는 형태를 보이고 있다. 위 식을 바탕으로 바람이 존재하는 형태에 따라 음선의 형태에 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 바람이 균일하게 분포한 공간을 지날 때 음선은 직선형으로 굴절하며 선형적인 분포 공간에서는 곡선형으로 굴절한다.

3.3 음선추적 방법을 기반으로 한 바람 영향에 대한 TDOA 추정위치 보정 알고리즘

음선추적을 이용한 정확도 향상 과정은 Fig. 4에 기술된 수행 과정을 거친다. 먼저 현장에서 측정된 신호를 기반으로 테일러 급수기반 TDOA 기법으로 초기추정위치 (x_0, y_0) 를 계산한다. 이후 음선추적을 이용한 보정과정을 거친다. 음선추적을 위해 센서와 소음원을 포함하는 영역에 격자를 설정하고 센서 위치에서의 바람 벡터를 획득하고, 모든 격자에서의 바람 벡터를 보간법을 이용해 각 격자점에서의 보정된 음속을 계산한다. 초기 계산된 초기추정위치 (x_0, y_0) (Fig. 5의 세모) 주변에 후보 추정위치 (x_{ray}, y_{ray}) (Fig. 5의 원)를 설정하고, 각 후보 추정위치에서 전방향으로 일정한 각도로 음선을 생성하여 각 센서에 도달하는 도달시간(time of arrival, TOA)을 계산한다. 이와 같은 방법으로 각 후보 추

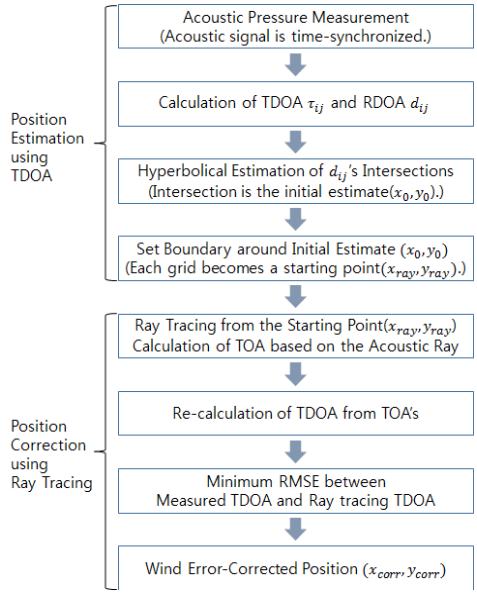
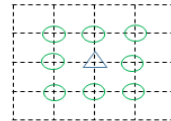
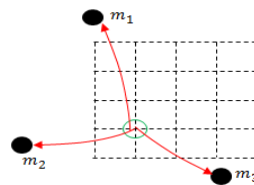


Fig. 4 Wind correction algorithm

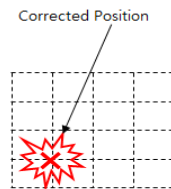
- ✕ : True Position
- △ : Estimation before Wind Correction
- : Ray Tracing Start Position



1. Set boundary for potential position.



2. Start ray tracing from each grid.



3. Find the closest estimate whose RMSE is minimum.

Fig. 5 Diagram of based on ray tracing

정위치에서 음선추적을 통해 반복계산을 하여 전과거리 R 과 도달시간을 계산하고, $TDOA_r$ 와 측정하여 구한 $TDOA_m$ 의 $RMSE$ 를 비교하여 최소가 되는 격자점이 바람을 고려한 위치 추적값(x_{corr}, y_{corr})이 된다.

$$TOA = \frac{R}{c} \tag{6}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N [TDOA_m(k) - TDOA_r(k)]^2} \tag{7}$$

N : TDOA항 개수

n^2 : 격자 개수

$i, j = 1, 2, 3, \dots, n$

3.4 격자 크기에 따른 음선추적방법 정확도

격자 크기에 따른 음선추적방법의 정확도를 확인을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 격자의 크기는 1 m, 0.1 m, 0.01 m으로 수행하였다. 바람의 분포는 높이에 따라 선형 증가를 하고, 음속은 340 m/s, 소음원의 위치는 (0 m, 0 m), 마이크로폰의 위치는 (50 m, 50 m)에 위치하도록 구성하였다. 결과는 Table 1, Fig. 6과 같다. Table 1에서 오일러-라그랑주 방정식을 이용하여 구한 도달시간과 격자의 크기에 따른 오차를 살펴보면 격자의 크기가 0.01 m이면 오차율이 -0.0007% 이므로 격자의 크기가 0.01 m면 적당한 것으로 여겨진다.

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션 조건은 격자간격은 0.01 m와 온도는 22 °C, 신호는 펄스 신호로 구성하였다. 센서의 위치는 소음원을 임의의 위치에서 둘러싸도록 배치하고 좌표는 Table 2와 같이 선정하였다. 풍향 풍속은 각 센서에서 측정하는 것을 가정하여 조건을 생성하였으며 균일한 바람, 선형적으로 증가하는 바람, 무작위적으로 부는 바람의 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

4.2 Case 1: 균일한 바람 분포

균일한 바람인 경우는 네 개 센서에서 같은 풍향

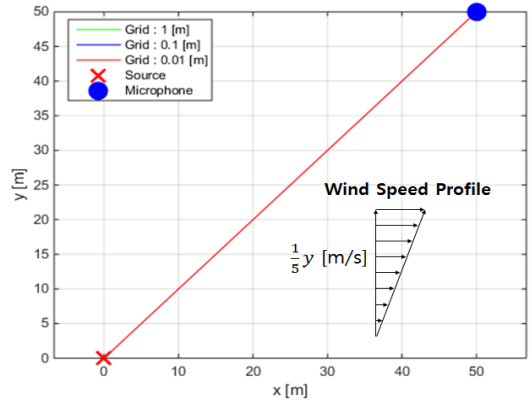


Fig. 6 Route of ray tracing as grid length

Table 1 Arrival of ray tracing as grid length

Grid [m]	Grid 1 m	Grid 0.1 m	Grid 0.01 m	Euler-Lagrange
Arrival time[sec]	0.205 85	0.205 85	0.205 84	0.205 84
Error[%]	-0.0039	-0.0015	-0.0007	.

Table 2 Source and sensors position

	Source	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
x[m]	0	33.67	-5.09	-32.68	15.89
y[m]	0	19.55	30.04	12.87	-62.04
z[m]	2	2	2	2	2

풍속인 경우다. 속도는 1 m/s부터 10 m/s까지 증가하며 시뮬레이션 하였고 그 결과가 Table 3에 나타나 있다. TDOA 기법으로 추정된 초기위치는 바람의 속도의 크기에 따라 오차의 크기가 증가하였다. 추정 위치가 y축에 따르지 않고 사선으로 되는 이유는 센서의 배열과 바람 조건에 의한 영향 때문이다. 음선추적 기법으로 바람 보정할 경우 TDOA 기법에 비해 정확도가 향상되는 것을 알 수가 있었다. 바람 보정 이후에 발생하는 오차는 초기추정 값을 기준으로 일정거리 떨어진 점들로부터 음선추적을 했기 때문으로 격자 크기에 의해 영향을 받을 수 있다.

4.3 Case 2: 불균일 바람 분포(선형증가)

바람이 선형적으로 증가하는 경우 Table 4의 Case 2와 같은 조건으로 풍속만 1 m/s에서 4 m/s까지 분포하도록 했고 풍향은 일정하게 유지하여 수행하였

Table 3 Case 1: Estimation using TDOA method and wind correction, uniform wind distribution

Wind speed [m/s]	Estimate from TDOA method			Estimate after wind correction		
	x[m]	y[m]	Distance error[m]	x[m]	y[m]	Distance error[m]
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	-0.0006	-0.1432	0.1432	-0.0006	-0.0032	0.0033
2	-0.0013	-0.2862	0.2862	-0.0013	0.0038	0.0040
3	-0.0021	-0.4290	0.4290	-0.0021	0.0010	0.0023
4	-0.0029	-0.5716	0.5716	-0.0029	-0.0016	0.0033
5	-0.0037	-0.7140	0.7140	-0.0037	0.0060	0.0070
6	-0.0047	-0.8563	0.8563	-0.0047	0.0037	0.0060
7	-0.0057	-0.9984	0.9984	-0.0057	0.0016	0.0059
8	-0.0067	-1.1404	1.1404	0.0033	-0.0004	0.0033
9	-0.0078	-1.2821	1.2821	0.0022	-0.0021	0.0030
10	-0.0090	-1.4238	1.4238	0.0010	-0.0038	0.0039

Table 4 Wind speed and direction

	Case 2		Case 3	
	Speed[m/s]	Direction	Speed[m/s]	Direction
Sensor 1	1	N	1	NE
Sensor 2	3	N	2	E
Sensor 3	4	N	3	NE
Sensor 4	2	N	4	N

Table 5 Case 2 and case 3: estimation using TDOA method and wind correction

	TDOA method			Wind correction		
	x[m]	y[m]	Distance error[m]	x[m]	y[m]	Distance error[m]
Case 2	0.0372	-0.3320	0.3340	-0.0028	-0.0020	0.0034
Case 3	-0.1206	-0.3628	0.3823	-0.0006	-0.0028	0.0028

다(Fig. 7).

4.4 Case 3: 불균일 바람 분포(랜덤분포)

바람이 무작위적으로 분포하는 경우 Table 4의 Case 3와 같은 조건으로 분포하도록 하였으며 바람 분포를 Fig. 8에서 확인할 수 있다. Case 2와 Case 3의 경우에 대하여 TDOA 기법과 바람의 영향을 고려한 보정한 결과는 Table 5와 같다. TDOA 기법으로 추정된 위치 오차가 음선추적 기법으로 정확한 위치를 보정하는 것을 확인할 수 있다.

4.5 시뮬레이션 결과 분석

바람을 고려하지 않고 위치 추정을 할 경우 오차가 발생하였다. 균일한 바람일 경우 오차는 바람이

불어오는 방향으로 거의 일정하게 위치 추정값 오차가 증가하였고, 불균일한 바람일 경우는 바람의 방향과 속도에 영향을 받아 오차가 발생하였다. 바람의 분포가 균일한 경우와 불균일 한 경우에 바람을 고려하여 음선추적으로 위치 추정된 오차 값은 시뮬레이션에서 설정한 격자의 크기 0.01 m 보다 작게 나왔다. Case 2와 Case 3에서의 바람 보정 후 오차 값을 보면 Case 2가 더 작게 나온다. 그 이유는 바람 보정 전의 위치 추정값을 기준으로 바람을 고려한 추정값 후보군들을 격자간격의 크기로 설정을 하게 되어 Case 3의 바람보정 위치 추정값의 오차가 더 크게 된다. 즉 바람 보정 전의 위치 추정값과 격자의 크기에 의해 오차값이 영향을 받는다.

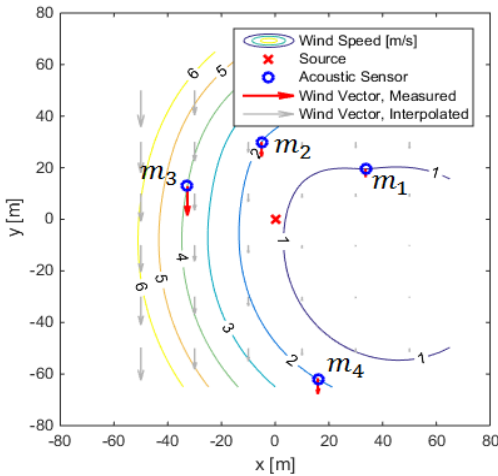


Fig. 7 Case 2: linear distribution of wind

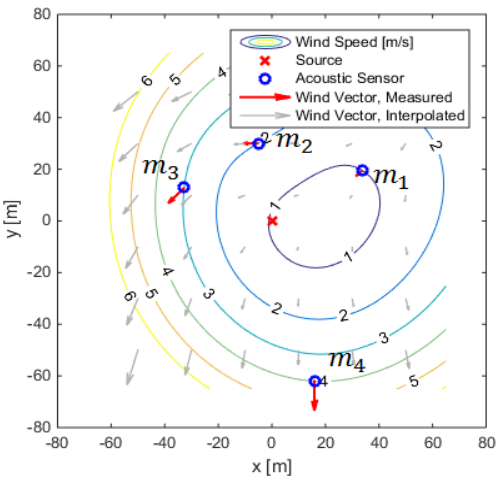


Fig. 8 Case 3: random distribution of wind

5. 결 론

이 연구를 통해 TDOA 기법에서 바람에 의해 발생하는 위치 추정값 오차를 측정된 바람의 정보를 기반으로 음선추적기법을 통해 오차를 줄이는 기법의 가능성을 확인하였다. 음선추적 기법 수행 시 센서를 향해 생성하는 음선들의 간격이 보정 정확도에 영향을 주는 중요한 인자인 것을 확인하였다. 또한 위치 추정 보정의 후보군으로 생성되는 격자간격도 정확도에 영향을 미치며 계산 속도 감소를 위해 효율적인 구간 생성이 필요함을 확인하였다. 음선추적을 통한 바람 보정은 유용이 존재하는

공간에서 바람 정보가 정확히 있는 한 매우 유효한 기법이며 도달시간을 정확히 계산함으로써 TDOA 추정값의 정확도 보장이 가능했다.

후 기

이 연구는 2015년도 국방과학연구소 개별기초연구인 ‘차분위성항법 시스템을 이용한 이벤트 위치측정 알고리즘 연구(ADD-13-01-04-11)’ 및 ‘음향 빔형성기법을 이용한 유도탄 초기/종말 탄도계측 (ADD-13-01-01-02)’ 과제의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Thomas, H. G., 1998, GIB Buoys: An Interface Between Space and Depths of the Ocean, Proceedings of IEEE Autonomous Underwater Vehicles, Cambridge, MA, USA, pp. 181~184.
- (2) Alcocer, A., Oliveira, P. and Pascoal, A., 2006, Underwater Acoustic Positioning Systems Based on Buoys with GPS, Proceedings of the Eighth European Conference on Underwater Acoustics, 8th ECUA, Carvoeiro.
- (3) Isik, M. T. and Akan, O. B., 2009, A Three Dimensional Localization Algorithm for Underwater Acoustic Sensor Networks, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 9, pp. 4457~4463.
- (4) Kayser, J. R., Cardoza, M. A. et al., 2005, Weapon Scoring Results from a GPS Acoustic Weapons Test and Training System, Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA.
- (5) Cardoza, M. A., Kayser, J. R. and Wade, B., 2006, Offshore Scoring of Precision Guided Munitions, Inside GNSS, pp. 20~27.
- (6) Cardoza, M. A., Cook, J. and Adamez, W., 2010, Acoustics & GPS – Real-time Scoring and Classification of Munitions, Inside GNSS, Vol. 5, No. 1, pp. 28~37.
- (7) Foy, W. H., 1976, Position-location Solutions by Taylor-series Estimation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. AES-12, No. 2, pp. 187~194.
- (8) Chestnut, P. C., 1982, Emitter Location Accuracy Using TDOA and Differential Doppler, IEEE

Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-18, No. 2, pp. 214~218.

(9) Smith, J. O. and Abel, J. S., 1987, The Spherical Interpolation Method of Source Localization, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. OE-12, No. 1, pp. 246~252.

(10) Fang, B. T., 1990, Simple Solutions for Hyperbolic and Related Position Fixes, 1990, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, pp. 748~753.

(11) Chan, Y. T. and Ho, K. C., 1994, A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 42, No. 8, pp. 1905~1915.

(12) Rhee, W. and Choi, J. S., 2006, Experimental Studies for Noise Source Positioning Using TDOA Algorithm, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 108~112.

(13) Lee, J.-H., Lee, J., Rhee, W. and Choi, J.-S., 2009, A Trajectory Identification Technique for Two Rotating Sound Sources with Different Frequencies, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 710~718.

(14) Kang, H. W., Hwang, D.-H. and Park, C., 2010, TDOA Measurement Based Taylor Series Design Method Considering Height Error for Real-time Locating Systems, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 16, No. 8, pp. 804~809.

(15) Oh, J., 2014, Optimum Design of the Microphone Sensor Array for 3D TDOA Positioning System, The Journal of IIBC, Vol. 14, No. 1, pp. 31~36.

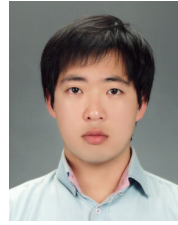
(16) Lamancusa Penn State, J. S., 2009, Noise Control Outdoor Sound Propagation.

(17) Hohenwarter, D. and Jelinek, F., 2000, Snell's Law of Refraction and Sound Rays for a Moving Medium, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 86, No. 1, pp. 1~14.

(18) Kornhauser, E. T., 1953, Ray Theory for Moving Fluids, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 25, No. 5, pp. 945~949.

(19) Rawlinson, N. and Sambridge, M., 2005, The

Fast Marching Method : an Effective Tool for Tomographic Imaging and Tracking Multiple Phases in Complex Layered Media Exploration Geophysics, Vol. 36, No. 4, pp. 341~350.



Donghun Choi received B.S., M.S., in Dept. of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Korea. He is a M.S. student. His research interests are in the area of aerodynamics and aeroacoustics.



Yeong-Ju Go received B.S., M.S., in Dept. of Aerospace Engineering from Chungnam National University, Korea. He is a Ph.D. candidate. His research interests are in the area of aerodynamics and aeroacoustics.



Jaehyung Lee received B.S. degree from Chungnam National University in 2001. He received his M.S. and Ph.D. degrees from CNU in 2003 and 2014, respectively. He is currently a PostDoc and lecturer at department of aerospace engineering, CNU. His research interests are aeroacoustics and acoustic signal processing.



Jong-Soo Choi received the B.S. from Seoul National University, the M.S. from KAIST and the Ph.D. degree from the Pennsylvania State University in 1991. He is currently a professor of Aerospace Engineering at Chungnam National University, Korea. His research interests include aerodynamics and aeroacoustics related to rotating machinery and moving vehicles.