

TDOA 기반 위치탐지를 위한 DOP을 이용한 시각동기화 주수신기 선택 기법

김 산 해[°], 송 규 하^{*}, 광 현 규^{**}

Method of Master Receiver Selection Using DOP for Time Synchronization in TDOA-Based Localization

Sanhae Kim[°], Kyuha Song^{*}, Hyungyu Kwak^{**}

요 약

수동형 감시시스템과 같은 TDOA(Time Difference Of Arrival) 기반의 위치탐지시스템은 다수의 수신기를 이격 설치 후에 수신기 간 시각동기화를 수행하여 동일한 시각으로 설정하고, 수신기에 수신되는 목표 신호의 도래시간 차인 TDOA를 이용하여 쌍곡선(또는 쌍곡면)의 교점을 구함으로써 목표의 2차원(또는 3차원) 위치를 추정한다. 시각동기화를 수행하기 위해서는 다수의 수신기 중에 하나가 주수신기(Master)가 되어 나머지 종수신기(Slave)들의 시간을 보정하기 위한 기준을 제공해야 한다. TDOA 기반의 위치탐지 시스템은 서로 이격되어 배치되어 있는 다수의 수신기 중에 선택되는 주수신기에 따라 위치추정정확도가 달라진다. 따라서 다수의 수신기 중에 최적의 수신기를 주수신기로 선택해야 고려하는 시스템의 배치구조에서 최적의 위치추정 성능을 도출할 수 있다. 본 논문에서는 목표와 수신기의 기하학적 배치 기반의 DOP(Dilution Of Precision) 정보를 이용하여 낮은 복잡도와 짧은 수행시간을 가지면서 시스템 내에 자동화가 용이한 주수신기 선택 방법을 제안한다.

Key Words : TDOA, Localization, Time Synchronization, DOP, Master Selection

ABSTRACT

TDOA(Time Difference Of Arrival)-based localization system such as the passive surveillance system performs the time synchronization between the receivers after separated installing multiple receivers to set the same clock for all receivers. And it estimates 2D(or 3D) location of the target by solving intersection of the multiple hyperbola(or hyperboloid) using TDOA. To perform time synchronization, one receiver must be set to the master, and it provide the reference data to compensate the clock of the rest of the slaves. The positioning accuracy of TDOA-based localization system is changed in accordance with the master that is selected among multiple receivers. So, the optimum receiver which is selected among multiple receivers must be set to master to get best performance in the considered deployment of receivers. In this paper, we propose a selection scheme of master receiver for time synchronization using DOP(Dilution Of Precision) which is based on location of the target and the multiple receivers. The proposed scheme has low complexity and short processing time, and it is easy to automate in the TDOA-based localization systems.

[°] First and Corresponding Author : Agency for Defense Development, ksh808@add.re.kr, 정회원

^{*} Agency for Defense Development, khsong@add.re.kr, 정회원

^{**} Agency for Defense Development, kwak1015@gmail.com, 정회원

논문번호 : KICS2016-06-137, Received June 30, 2016; Revised September 1, 2016; Accepted September 1, 2016

I. 서 론

수동형 감시시스템과 같은 TDOA(Time Difference Of Arrival) 기반의 위치탐지시스템은 다수의 이격된 수신기에 수신되는 목표 신호의 도래시간차인 TDOA를 이용하여 쌍곡선(또는 쌍곡면)의 교점을 구함으로써 목표의 2차원(또는 3차원) 위치를 추정한다. 따라서 추정되는 위치의 추정정확도를 높이기 위해서는 다수의 이격된 수신기 사이에 GPS 동시관측(CV; Common View) 및 TWSTFT (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer) 등의 기술을 이용한 시각동기화가 반드시 수행되어야 한다^[1]. 시각동기화를 수행하기 위해서는 다수의 수신기 중에 하나의 수신기가 주수신기(Master)가 되어 나머지 종수신기(Slave)들의 시간을 보정하기 위한 기준을 제공해야 하며, 서로 이격되어 다양하게 배치되어 있는 다수의 수신기 중에 선택되는 주수신기에 따라 위치추정정확도가 달라진다. 따라서 다수의 수신기 중에 최적의 수신기를 주수신기로 선택해야 고려하는 시스템의 배치 구조에서 최적의 위치탐지 성능을 도출할 수 있다. 이를 위해서는 보통 M&S(Modeling & Simulation) 등의 확률적 시뮬레이션을 통하여 최적의 주수신기를 선택하지만, 그 수행 및 분석시간이 많이 소요된다. 또한, 대부분의 수동형 감시시스템과 같이 수신기가 이동형인 경우에는 매 번 M&S를 수행하여 최적의 주수신기를 선택해야 하므로 기동성이 크게 떨어지게 된다. 한편, 위성을 이용한 위치추정의 정확도는 상공에 있는 GPS(Global Positioning System) 위성의 배치와 지상에 위치한 단말 간의 기하학적 위치에 따라 그 정도가 영향을 받게 된다. 이를 무차원 수치로 나타낸 것이 DOP(Dilution Of Precision)^[2]이며, 이 수치가 커질수록 위치추정정확도가 저하하게 된다. 본 논문에서는 일반적으로 위성에서 사용되는 DOP 정보를 지상에 설치된 다수의 이격된 수신기와 이동 또는 고정된 목표의 위치에 적용하여 TDOA 기반의 위치탐지시스템의 위치추정정확도 분석에 이용하고자 한다. TDOA 정보 기반의 위치탐지시스템에서 수신기 배치구조와 목표의 위치에 따른 DOP의 분포는 다양한 오차 요인을 포함한 M&S를 통해 도출된 위치추정정확도의 분포와 유사하기 때문에 이를 이용하여 DOP 분포만으로 위치탐지시스템의 위치추정정확도를 예측할 수 있다.

본 논문에서는, 이러한 DOP 분포와 위치추정정확도의 상관관계를 이용하여, TDOA 기반의 위치탐지시스템에서 시각동기화를 위한 최적의 주수신기를 선

택하는 방법을 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 최적의 주수신기 선택 방법을 적용하면, 기존의 M&S에 비해 수행시간이 매우 짧고, 시스템 내에 자동 분석이 용이하여 수신기가 이동형인 수동형 감시시스템의 기동성 측면 및 운용인력 측면에서 매우 유용할 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 위치탐지시스템의 개요와 TDOA 기반의 위치추정방법에 대해 기술하고, 3장에서는 TDOA 기반의 위치탐지시스템에 적용되는 DOP에 대해 설명하고자 한다. 4장에서는 DOP을 이용하여 위치탐지시스템에서 시각동기화를 위한 최적의 주수신기를 선택하는 방법에 대해 기술한다. 5장에서는 본 논문에서 제안하는 기법의 성능 분석을 위한 모의실험 환경 및 그 결과를 제시하고, 마지막으로 6장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. TDOA 기반의 위치탐지시스템

2.1 위치탐지시스템 개요

TDOA 기반의 위치탐지시스템은 그림 1과 같이 다수의 수신기를 일정 거리만큼 이격시켜 설치하고, 목표의 방사 신호를 수신기에서 수신한 신호도착시간의 상호간 차이인 TDOA를 이용하여 해당 목표의 위치를 추정한다. 이를 위해, 수신기 간에 동일한 시각을 맞춰주는 무선 상의 시각동기화 수행이 선행되어야 한다.

일반적으로 사용하는 시각동기화 기법은 각 수신기에서 수신한 GPS 시각정보를 사용하는 방법으로, GPS 수신기의 발달과 GPS 위성의 정확도 향상으로 수신기 사이의 시각동기 오차는 25ns ~ 50ns

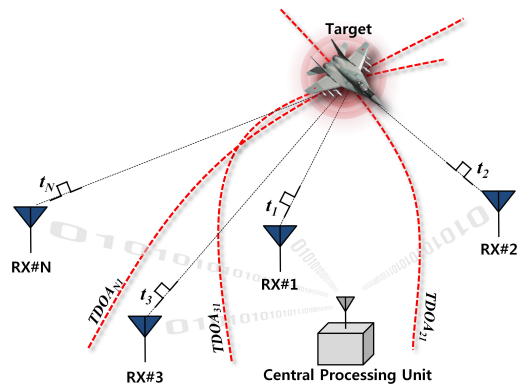


그림 1. TDOA 기반의 위치탐지시스템
Fig. 1. TDOA-based Localization Systems

RMS(Root Mean Square) 수준으로 알려져 있다³⁾. 시각동기 성능을 향상시키기 위한 대표적인 방법은 GPS를 이용한 양방향 시각전송 기법인 TWSTFT (Two Way Satellite Time and Frequency Transfer) 기법과 동일 GPS 동시 관측을 이용한 GPS CV (Common View) 기법 등이 있다⁴⁾. TDOA 기반 위치 탐지시스템에서의 시각동기화는 다수의 수신기 중에 주수신기를 설정하고 주수신기에서 시각 보정 데이터를 부수신기에 전달하여 부수신기 내의 루비덤 클락 같은 원자시계를 보정하는 형태로 수행되며, 원하는 목표 성능을 갖도록 다양한 시각동기화 기법이 적용된다. 여기서, 목표 성능은 주수신기와 부수신기 사이의 시각동기성능이며, 부수신기들 간의 시각동기성능은 $\sqrt{2}$ 배 만큼 성능이 저하하게 되므로 최적의 위치 추정 성능을 갖는 주수신기를 선택한 이후에 시각동기화를 수행하는 것이 필수적이다.

위치탐지시스템에서 시각동기화 안정화가 완료되면, 다수의 이격되어 운용되는 수신기에서 목표의 송신 신호를 수신하여 신호원의 도착시간인 TOA(Time Of Arrival) 정보를 중앙의 처리장치로 전송한다. 중앙의 처리장치는 수신기들로부터 수신한 TOA를 이용하여 수신기 간의 TDOA 정보를 추출하고 이를 이용하여 목표의 위치를 추정한다. 이 후, 운용자의 화면에 목표의 추정된 위치를 실시간으로 도시함으로써 전장의 상황을 파악할 수 있도록 한다.

2.2 TDOA 기반의 위치추정 기법

TDOA 기반의 위치추정 기법은 목표의 방사 신호를 다수의 이격된 수신기에서 수신하여 측정된 신호 측정시간(TOA)의 상호간 차이인 TDOA 정보를 이용하여 해당 목표의 위치를 추정한다. 즉, N 개의 수신기에서 수신된 목표 신호의 도착시간인 TOA, $t_i (i=1, \dots, N)$ 으로부터 주수신기인 첫 번째 수신기를 기준으로 $(N-1)$ 개의 TDOA 정보를 추출하고, 이로부터 목표와 수신기간 거리방정식에 기초하여 형성되는 쌍곡선(또는 쌍곡면)의 교차점으로 목표의 위치를 추정하게 된다.

TDOA 기반의 목표 위치추정 원리는 다음과 같다. 먼저 목표의 위치를 추정하기 위해 우리가 알 수 있는 정보는 각 수신기의 위치와 각 수신기에서 신호를 수신한 시간이다. 각 수신기에서 목표의 신호를 측정할 시간이 $t_i (i=1, \dots, N)$ 이면 i 번째 수신기와 주수신기인 첫 번째 수신기 사이의 신호도착시간차이인 TDOA, ΔT_{i1} 는 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{i1} = t_i - t_1 \quad (i=2, \dots, N) \quad (1)$$

한편, 목표와 i 번째 수신기 간의 거리는 R_i 이라 정의하면 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, R_1 와 R_i 사이의 거리차이 ΔR_{i1} 는 두 수신기 간 신호 측정 시간의 차이인 ΔT_{i1} 와 빛의 속도 c 의 곱과 같으므로 다음의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{i1} &= c \times \Delta T_{i1} = R_i - R_1 \quad (i=2, \dots, N) \\ &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 (x_i, y_i) 는 i 번째 수신기의 2차원 위치이고, (x, y) 는 추정하고자 하는 목표의 2차원 위치이다.

TDOA 기반의 위치탐지시스템에서 3개의 수신기를 사용하는 경우에는 다음의 식 (4)와 같이 2개의 쌍곡선 수식이 형성되며, 이를 비선형 방정식으로 변환하며 반복적(Iterative) 또는 비반복적(Non-iterative) 방법으로 비선형 방정식의 해를 구함으로써 목표의 2차원 위치를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta R_{i1} &= c \times \Delta T_{i1} \\ &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

$(i=2, 3)$

한편, 고도를 포함한 목표의 3차원 위치를 추정하기 위해서는 4개 이상의 수신기를 사용하여야 한다. 4개의 수신기를 사용하는 경우, 다음의 식 (5)와 같이 3개의 쌍곡면 수식이 형성되며, 마찬가지로 3개의 쌍곡면의 교차점을 찾기 위한 비선형 방정식의 해를 구함으로써 목표의 3차원 위치를 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta R_{i1} &= c \times \Delta T_{i1} \\ &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \\ &\quad - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

$(i=2, 3, 4)$

여기서 (x_i, y_i, z_i) 는 i 번째 수신기의 3차원 위치이고, (x, y, z) 는 추정하고자 하는 목표의 3차원 위치이다. 다음의 그림 2와 그림 3은 수신기 3개를 사용하는 경우에 쌍곡선의 교점을 구하여 목표의 2차원 위치를

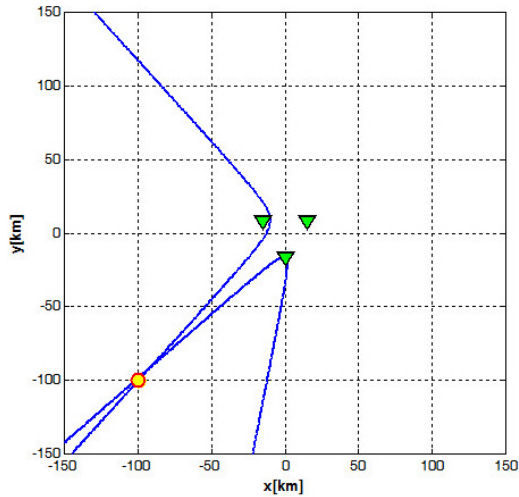


그림 2. 목표의 2차원 위치추정의 예시 (수신기 3개)
Fig. 2. Example of 2D Positioning using 3 Receivers

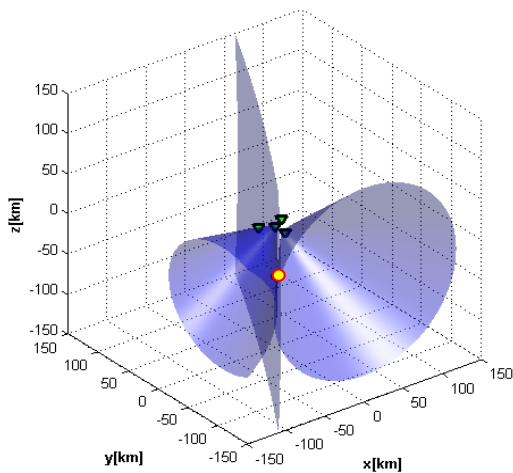


그림 3. 목표의 3차원 위치추정의 예시 (수신기 4개)
Fig. 3. Example of 3D Positioning using 4 Receivers

추정하는 예시와 수신기 4개를 사용하는 경우에 쌍곡면의 교점을 구하여 목표의 3차원 위치를 추정하는 예시를 각각 보여주고 있다.

목표의 2차원 또는 3차원 위치를 추정하기 위해서는 식 (4) 또는 식 (5)에 주어진 비선형 방정식의 해를 구해야 한다. TDOA 기반의 위치추정 시스템에서 비선형 방정식의 해를 구하는 방법은 반복적 연산을 요구하는 방법과 비반복적 연산을 수행하는 방법이 있다. 반복적 연산을 수행하여 위치를 추정하는 기법으로는 Levenberg-Marquardt 기법^[5]과 Gauss-Newton 기법^[5]이 대표적이다. Gauss-Newton 기법은 비선형 방정식을 풀기 위한 초기값에 민감하여 그 값을 잘못

설정하면 지역 최소값(Local Minima)에 쉽게 빠질 수 있는 단점이 있다. Levenberg-Marquardt 기법은 Gauss-Newton 기법에 비해 초기값에 상대적으로 덜 민감하며, 수동형 감시시스템과 같은 원거리 위치추정 시스템에 적합하다. 한편, 비반복적 연산을 수행하는 기법으로는 Chan의 기법^[6,7]과 Fang의 기법^[8]이 대표적이며, 반복적 연산 기법에 비해 연산량이 크게 줄어드는 장점이 있다. 이러한 비반복적 연산을 수행하는 기법은 시각동기화 성능이 좋은 환경에서는 연산량을 크게 줄이면서 반복적 연산을 통한 위치추정과 비슷하거나 동일한 성능을 가지나, 시각동기 오차가 큰 환경에서는 이를 이용한 위치추정 성능이 상대적으로 저하된다. 또한, 수신기가 특정 개수이어야 목표의 위치추정이 가능하며, 수신기 배치구조가 동일선상 및 동일 평면상에 위치하지 않아야 추정 과정에서 특이행렬이 존재하지 않아 그 풀이가 가능하다고 알려져 있다^[9]. 한편, 최근에는 반복적 연산을 수행하면서 그 반복 횟수를 감소시켜 위치추정을 위한 연산량을 줄이는 방법이 활발히 연구되고 있다^[10].

III. 위치탐지시스템에서의 DOP

GPS 위성에서 지상 단말의 위치 추정 시 일반적으로 위성신호의 전파도달 시간인 TOA를 측정하여 삼변측량 방식으로 단말의 위치를 추정한다. 이 때, 사용되는 위성의 배치와 지상 단말의 위치에 따라 GPS를 이용한 추정정확도가 달라진다. DOP은 위치추정을 위한 위성의 배치에 따른 GPS 기반 위치추정정확도를 무차원 수치로 나타낸 것으로 DOP의 수치가 커질수록 위치추정정확도가 저하하게 된다.

GPS 기반 위치추정시스템과 같이 TOA를 이용하는 경우의 DOP을 계산하기 위한 기하학적 행렬 H 는 다음과 같이 각 축에 대해 단말기로부터 GPS 위성까지의 단위 벡터 형태와 마지막 열의 시간요소로 정의된다^[11].

$$H = \begin{pmatrix} \left(\frac{x-x_1}{R_1}\right) & \left(\frac{y-y_1}{R_1}\right) & \left(\frac{z-z_1}{R_1}\right) & 1 \\ \left(\frac{x-x_2}{R_2}\right) & \left(\frac{y-y_2}{R_2}\right) & \left(\frac{z-z_2}{R_2}\right) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{x-x_N}{R_N}\right) & \left(\frac{y-y_N}{R_N}\right) & \left(\frac{z-z_N}{R_N}\right) & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서, (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, \dots, N$)는 사용되는 N 개의

GPS 위성의 위치이며, (x, y, z) 는 지상의 단말의 위치이다. R_i 는 지상의 단말기와 i 번째 GPS 위성 간의 거리이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (7)$$

DOP의 종류로는 2차원 평면 위치오차정도를 나타내는 HDOP(Horizontal DOP), 고도의 오차정도를 나타내는 VDOP(Vertical DOP), 평면과 고도를 모두 고려하는 3차원적인 위치오차정도를 나타내는 PDOP(Position DOP) 그리고 기하학적 위치오차정도를 나타내는 GDOP(Geometric DOP)이 있으며 이의 각각의 수식은 다음과 같다.

$$HDOP = \sqrt{((H^T H)^{-1})_{1,1} + ((H^T H)^{-1})_{2,2}} \quad (8)$$

$$VDOP = \sqrt{((H^T H)^{-1})_{3,3}} \quad (9)$$

$$PDOP = \sqrt{((H^T H)^{-1})_{1,1} + ((H^T H)^{-1})_{2,2} + ((H^T H)^{-1})_{3,3}} \quad (10)$$

$$GDOP = \sqrt{\text{trace}((H^T H)^{-1})} \quad (11)$$

여기서 $()^T$ 는 전치 행렬, $()^{-1}$ 은 역행렬이며, $()_{i,j}$ 는 행렬의 i 번째 행의 j 번째 열의 원소값을 의미하고, $\text{trace}(\)$ 는 정방행렬의 대각합을 나타낸다.

한편, 본 논문에서 고려하는 TDOA 기반의 위치탐지시스템의 기하학적 행렬은 식 (12)와 같이 각 측의 단위 벡터의 차이 형태로 정의된다^[11].

TDOA 기반의 위치탐지시스템의 기하학적 행렬 H 에는 TOA 기반의 시스템과 달리 시간 요소가 없기 때문에 PDOP과 GDOP의 값이 같게 된다. 이와 같이 DOP은 수신기의 배치와 목표의 위치에 따라 그 값이 결정되며, 그 값이 작을수록 위치추정정확도가 향상된다. 본 논문에서는 2차원과 위치오차 분석을 위해 HDOP을 사용하고, 3차원의 위치오차 분석을 위해

PDOP을 이용하고자 한다.

IV. DOP을 이용한 시각동기화 주수신기 선택 방법

다음의 그림 4는 4개의 수신기를 사용하는 TDOA 기반 위치탐지시스템에서 각 수신기를 주수신기로 설정함에 따른 시각동기화 수행 개념도이다. 예를 들어, 1번 수신기가 주수신기이면 시각동기화는 1-2, 1-3, 1-4의 수신기 쌍으로 수행된다. 특정 위치탐지시스템의 시각동기화 능력이 k 초의 오차분포를 가지다고 가정하면, 1-2, 1-3, 1-4의 수신기 쌍에 대한 시각동기화 오차분포는 k 초이지만 2-3, 2-4, 3-4의 수신기 쌍에 대한 시각동기화 오차분포는 $\sqrt{2}k$ 초를 갖게 되어 시각동기화 오차가 증가하게 된다. 이와 같이, 같은 수신기 배치 환경이라도 어떤 수신기가 주수신기로 설정되느냐에 따라 시스템의 위치추정 성능이 달라져서, 최적의 주수신기를 선택하는 과정이 반드시 필요하다.

TDOA 기반의 위치탐지시스템의 시각동기화를 위한 최적의 주수신기를 선택하기 위해서는 다수의 수신기 배치를 마친 다음 전체 수신기 개수(N) 만큼 주수신기를 바꿔가면서 시스템을 운용함에 있어서 고려하고 있는 전장의 특정 단일 위치 또는 전장의 특정 영역과 같이 특정 위치열에 대한 DOP 계산이 선행되어야 한다. 즉, 가상목표의 특정 위치열에 대한 DOP을 계산하여 모든 수신기가 주수신기로 선택되었을 때의 평균 HDOP(또는 PDOP)이 최소인 수신기를 최적의 주수신기로 선택하는 것이다. 이를 위해, 다음과 같이 각 수신기를 주수신기로 설정하여 N 개의 수신기에 대해 가상목표의 특정 위치열에 대한 평균 DOP을 구한다.

$$HDOP_i = \text{average}(\overline{HDOP}_i) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (13)$$

$$PDOP_i = \text{average}(\overline{PDOP}_i) \quad (i = 1, \dots, N) \quad (14)$$

$$H = \begin{bmatrix} \left(\frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_2}{R_2} \right) & \left(\frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_2}{R_2} \right) & \left(\frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_2}{R_2} \right) \\ \left(\frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_3}{R_3} \right) & \left(\frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_3}{R_3} \right) & \left(\frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_3}{R_3} \right) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{x-x_1}{R_1} - \frac{x-x_N}{R_N} \right) & \left(\frac{y-y_1}{R_1} - \frac{y-y_N}{R_N} \right) & \left(\frac{z-z_1}{R_1} - \frac{z-z_N}{R_N} \right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

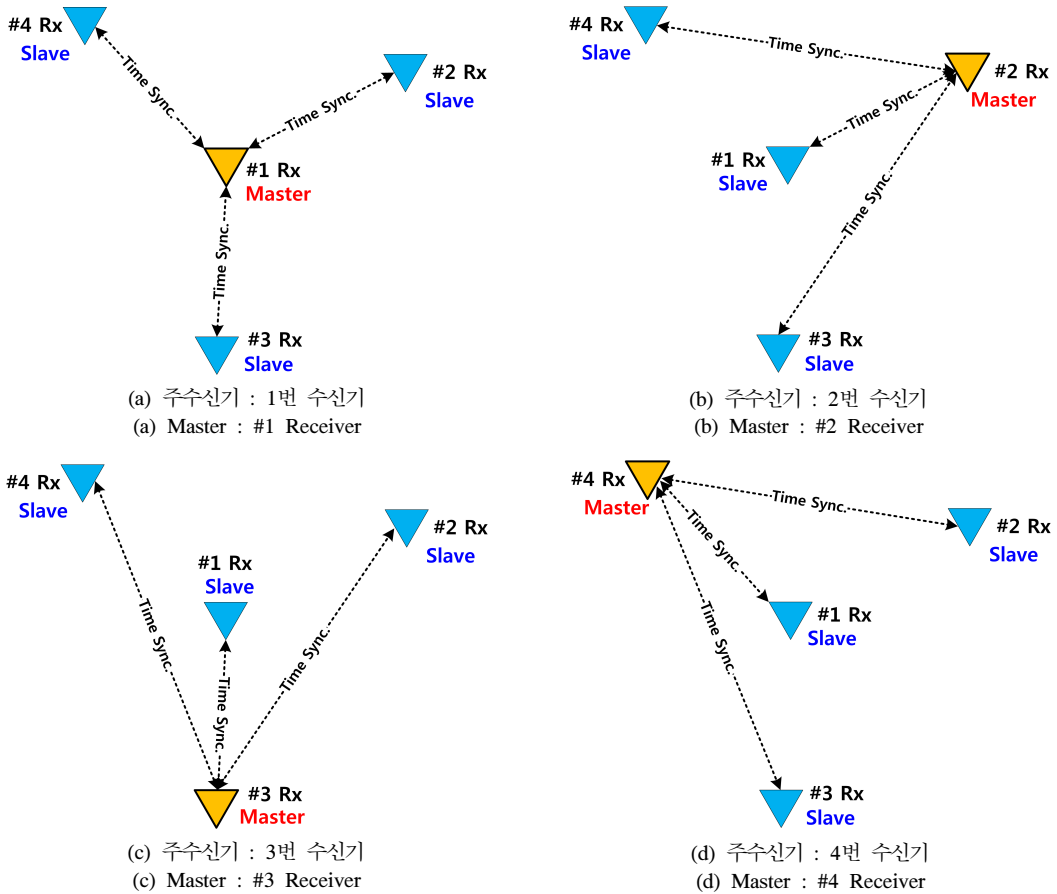


그림 4. 주수신기 선택에 따른 시각동기화 수행 개념도 (수신기 4개)
Fig. 4. Time synchronization performing according to Master selection

여기서 \overline{HDOP}_i 과 \overline{PDOP}_i 은 i 번째 수신기를 주수신기로 설정한 경우의 가장목표의 특정 위치열에 대한 HDOP과 PDOP의 값을 벡터로 나타낸 것이고, $HDOP_i$ 과 $PDOP_i$ 은 이의 평균값을 나타낸 것이다.

이 후, 최적의 주수신기는 다음의 식과 같이 N 개의 수신기 중 $HDOP_i$ 또는 $PDOP_i$ 의 값이 가장 작은 i_{opt} 번째 수신기로 설정된다. 여기서 2차원 위치탐지시스템인 경우에는 식 (15)와 같이 $HDOP_i$ 을 이용하고, 3차원 위치탐지시스템인 경우에는 식 (16)과 같이 $PDOP_i$ 을 이용하여 최적의 주수신기 인덱스를 구한다.

$$i_{opt} = \underset{(i = 1, \dots, N)}{\operatorname{argmin}_i} (HDOP_i) \quad (15)$$

$$i_{opt} = \underset{(i = 1, \dots, N)}{\operatorname{argmin}_i} (PDOP_i) \quad (16)$$

이와 같이 DOP을 이용하여 시각동기화를 위한 주수신기를 선택할 때 고려되는 전장의 위치는 단일 또는 다중위치가 될 수 있다. 이는 운용자가 시스템 운용환경에 따른 목표의 접근방향 또는 특정 감시 영역 등을 고려하여 선택하면 된다.

V. 모의실험

5.1 모의실험 환경

본 논문에서 고려하는 모의실험 환경은 다음의 표 1과 같으며, TDOA 기반의 위치추정을 위한 비선형 방정식 풀이 알고리즘은 Levenberg-Marquardt 기법^[5] 을 사용하였다. 각 수신기의 위치오차는 없다고 가정하였으며, 고려하는 전장의 영역은 1번 수신기로부터 $\pm 200\text{km}$ 로 설정하였다. 또한, 주수신기와 부수신기 간의 시각동기 오차는 25ns RMS로 동일하게 설정하였다. 시각동기 오차의 정도는 본 논문에서 제안하는

표 1. 모의실험 환경
Table 1. Main parameters for simulation

Parameters	Values
Number of Receivers	4
Receivers Position (x, y, z)	#1 (0, 0, 0)
	#2 (30km, 10km, 100m)
	#3 (20km, 0, 50m)
	#4 (30km, -30km, 250m)
Time Synchronization Error Distribution	25ns RMS (Normal Distribution)
Time Resolution	1ns
Considering Target Altitude	5km

시각동기화를 위한 주수신기 선택 기법의 성능 검증을 위한 위치추정정확도 성능의 정도에만 동일하게 영향을 미치며, 주수신기 선택 결과에는 영향을 미치지 않는다.

위치추정정확도의 성능 평가지표로는 평면상의 정확도인 CEP(Circular Error Probable)와 3차원상의 정확도인 SEP(Spherical Error Probable)를 사용한다^[12]. 여기서 CEP는 위치정확도의 대표적인 측정치로, 목표의 위치의 2차원 수평좌표를 기준으로 추정된 위치의 50%가 포함되는 원의 반경을 미터로 나타낸 것이고 SEP는 3차원 좌표를 기준으로 추정된 위치의 50%가 포함되는 구의 반경을 의미한다. 다음의 그림 5는 본 논문에서 고려하는 임의의 수신기 배치구조를 보여주고 있다.

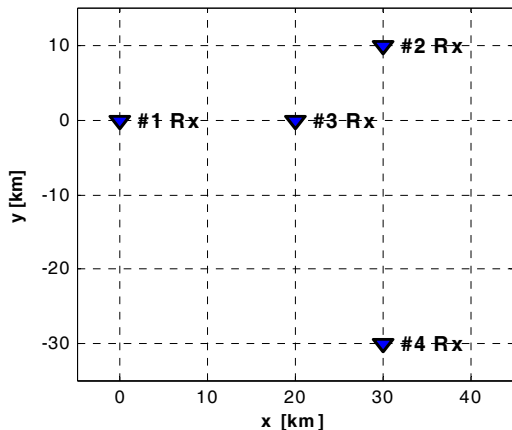


그림 5. 수신기 배치구조
Fig. 5. Deployment of receivers

5.2 모의실험 결과

본 절에서는 TDOA 기반의 위치탐지시스템의 시

각동기화를 위한 주수신기 선택 기법에 대한 모의실험 결과를 설명하고자 한다. 먼저 그림 5와 같이 4개의 수신기를 배치하고, 각 수신기가 주수신기로 설정된 경우마다 고려하는 전장영역 내인 ±200km에서 10km 간격의 격자 형태로 2차원 위치오차정도를 위한 HDOP을 계산하였다. 그림 6은 각 수신기가 주수신기로 설정된 경우에 대한 각각의 HDOP 분포를 등고선 그래프로 도시하고 있다. 또한, 각 경우에 대한 전체 평균값인 $HDOP_i$ 는 표 2에 정리하였다.

결과를 보면, 세 번째 수신기가 주수신기로 설정되었을 경우에 $HDOP_i$ 이 177.33으로 그 값이 가장 작으며, 네 번째 수신기가 주수신기로 설정되었을 경우에는 $HDOP_i$ 이 331.06으로 값이 가장 크며, 그 차이 비율이 약 1.87배임을 알 수 있다. 이는 세 번째 수신기를 시각동기화를 위한 주수신기로 선택하게 되면 주어진 수신기 배치구조에서 가장 높은 위치추정 성능을 가질 수 있음을 의미하며, 네 번째 수신기가 주수신기로 선택되어 시각동기화를 수행하면 위치추정 성능이 가장 낮을 것으로 예측할 수 있다.

이를 검증하기 위해, 각 수신기를 주수신기로 설정된 경우에 대해 실제 위치추정을 수행한 M&S 결과를 도출하여 위치추정정확도 분석을 위해 그림 7과 같이 CEP 분포를 등고선 그래프로 도시하였다. 결과를 보면, 세 번째 수신기가 주수신기로 선택된 경우의 CEP 값이 전역에 걸쳐 다른 경우에 비해 상대적으로 낮아 위치추정 성능이 높음을 확인할 수 있으며, 네 번째 수신기가 주수신기로 선택된 경우는 다른 경우에 비해 CEP 값이 상대적으로 높아 위치추정정확도가 저하됨을 알 수 있다. 예를 들어, 목표가 (150km, 150km)에 위치한다고 가정한다면, 세 번째 수신기가 주수신기인 경우는 CEP 값이 약 1,442m이고 네 번째 수신기가 주수신기인 경우는 CEP 값이 약 2,636m으로 그 차이 비율이 약 1.83배로 $HDOP_i$ 차이의 비율과 근사함을 알 수 있다. 이 결과는 $HDOP_i$ 값이 가장 작은 세 번째 수신기를 주수신기로 선택하는 경우가 본 수신기 배치구조에서 가장 높은 2차원 위치추정정확도를 가짐을 보여주고 있다.

다음은 3차원 위치오차정도를 확인하기 위해 각 수

표 2. 주수신기 선택에 따른 HDOP 평균값
Table 2. Average HDOP according to Master selection

Master Index, i	1	2	3	4
Average HDOP, $HDOP_i$	320.63	303.06	177.33	331.06

표 3. 주수신기 선택에 따른 PDOP 평균값
Table 3. Average PDOP according to Master selection

Master Index, i	1	2	3	4
Average PDOP, $PDOP_i$	472.33	430.23	334.00	490.01

신기가 주수신기로 설정된 경우마다 본 논문에서 고려하는 전장영역 내에서 PDOP을 계산하였다.

그림 8은 각 수신기가 주수신기로 설정된 경우에 대해 각각의 PDOP 분포를 등고선 그래프로 도시하고 있으며, 각 경우에 대한 전체 평균값인 $PDOP_i$ 는 표 3에 정리하였다.

결과를 보면, 앞서의 경우와 마찬가지로 세 번째 수

신기가 주수신기로 설정되었을 경우에 $PDOP_i$ 이 334.00으로 가장 작으며, 네 번째 수신기가 주수신기로 설정되었을 경우에는 $PDOP_i$ 이 490.01으로 그 값이 가장 크다. 그리고 가장 큰 값과 작은 값의 차이 비율이 약 1.47배임을 알 수 있다. 이는 가장 높은 3차원 위치추정 성능을 가지기 위해서는 세 번째 수신기를 시각동기화를 위한 주수신기로 선택해야하며, 네 번째 수신기가 주수신기로 선택되어 시각동기화를 수행하면 3차원 위치추정 성능이 가장 낮음을 의미한다.

주어진 모의실험 환경에서 실제 위치추정을 수행한 M&S 결과의 SEP 분포가 그림 9와 같이 등고선 그래프로 도시되어 있다. 고도를 포함한 3차원 위치추정 정확도인 SEP 결과를 보면, 세 번째 수신기가 주수신기

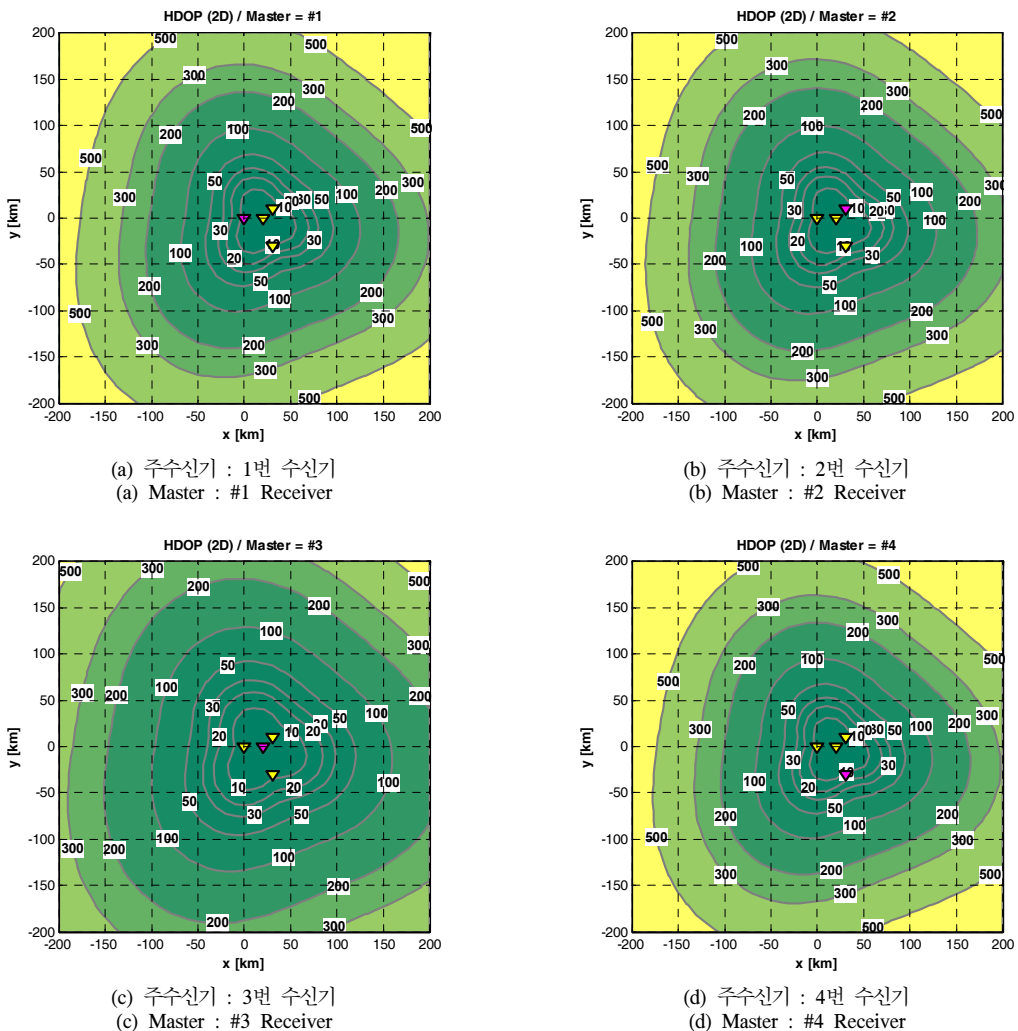
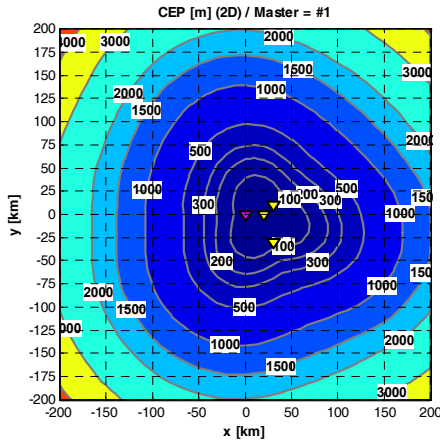
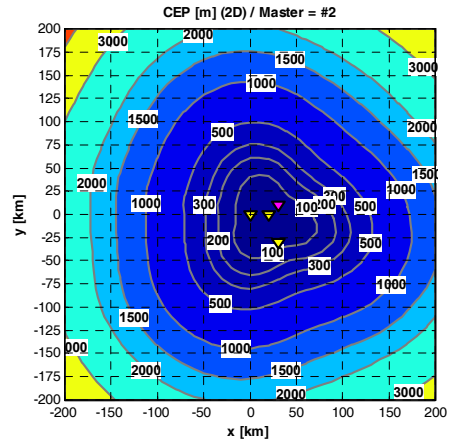


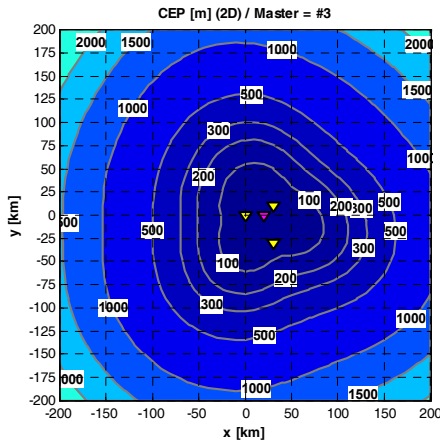
그림 6. 주수신기 선택에 따른 HDOP 분포
Fig. 6. HDOP distribution according to Master selection



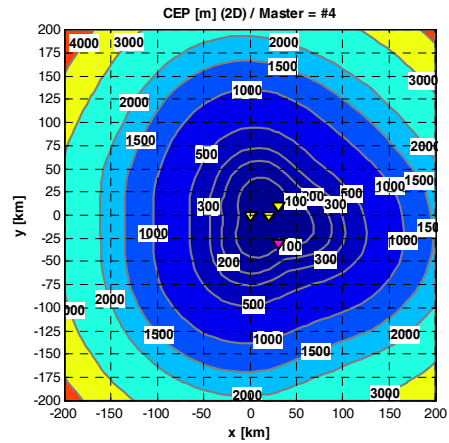
(a) 주수신기 : 1번 수신기
(a) Master : #1 Receiver



(b) 주수신기 : 2번 수신기
(b) Master : #2 Receiver



(c) 주수신기 : 3번 수신기
(c) Master : #3 Receiver



(d) 주수신기 : 4번 수신기
(d) Master : #4 Receiver

그림 7. 주수신기 선택에 따른 CEP 분포
Fig. 7. CEP distribution according to Master selection

로 선택된 경우의 SEP 값이 다른 수신기가 주수신기로 선택된 경우에 비해 상대적으로 낮아 가장 높은 3차원 위치추정 성능을 가짐을 확인할 수 있으며, 네 번째 수신기가 주수신기로 선택된 경우는 SEP 값이 상대적으로 높아 가장 낮은 3차원 위치추정 성능을 가짐을 알 수 있다. 앞서의 2차원 위치추정 결과와 마찬가지로의 예를 들면, 목표가 (150km, 150km)에 위치할 때 세 번째 수신기가 주수신기인 경우는 SEP 값이 약 2,894m이고 네 번째 수신기가 주수신기인 경우는 SEP 값이 약 4,233m으로 그 차이 비율이 약 1.46배가 되어 $PDOP_i$ 차이 비율과 거의 일치함을 알 수 있다. 마찬가지로, 이 결과는 $PDOP_i$ 값이 가장 작은 세

번째 수신기를 주수신기로 선택하여 시각동기화를 수행하는 경우가 본 수신기 배치구조에서 가장 높은 3차원 위치추정 성능을 가짐을 보여주고 있다.

VI. 결론

수동형 감시시스템과 같은 TDOA 기반 위치탐지 시스템은 다수의 이격된 수신기에 수신되는 목표 신호의 도래시간차인 TDOA 정보를 이용하여 목표의 2차원 또는 3차원 위치를 추정한다. 이 때, 추정되는 위치의 추정정확도를 높이기 위해서는 다수의 이격된 수신기 간에 시각동기화가 반드시 수행되어야 한다.

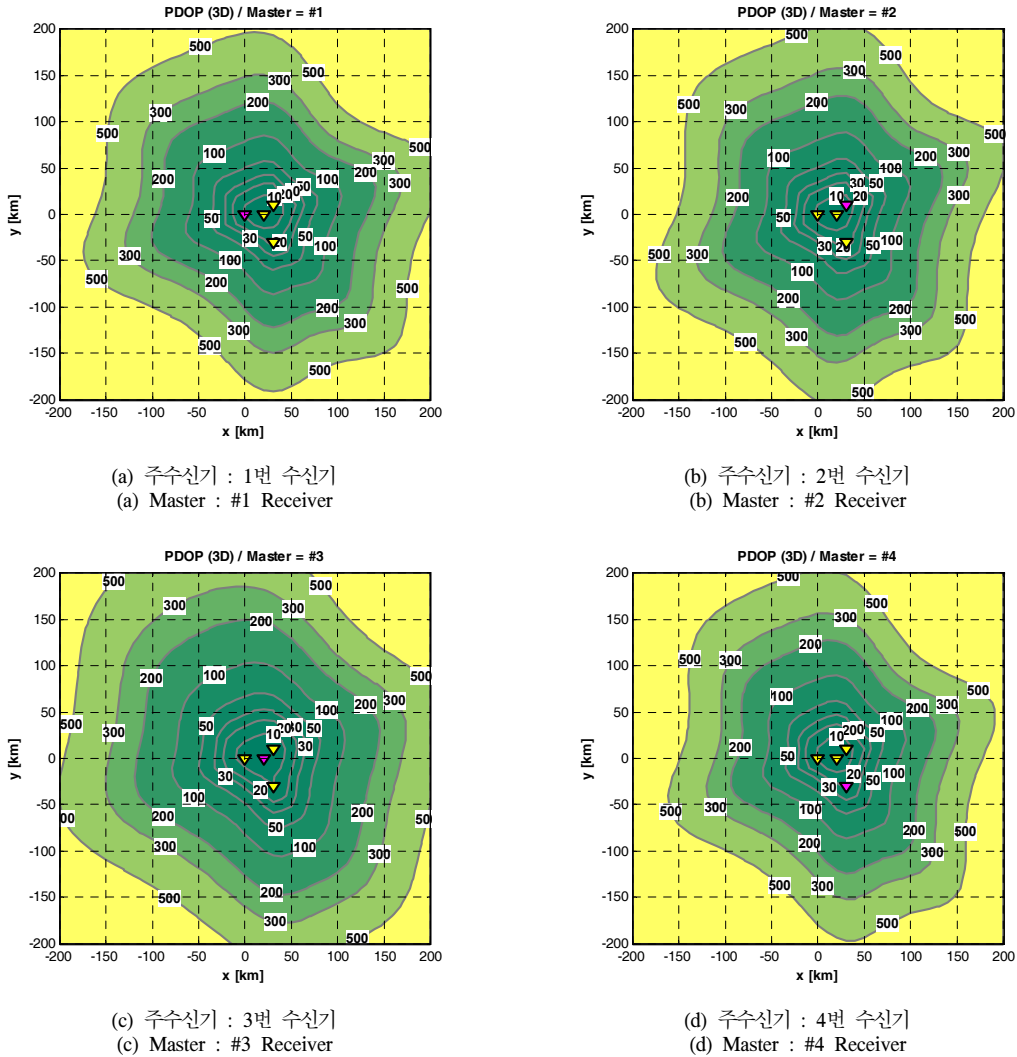
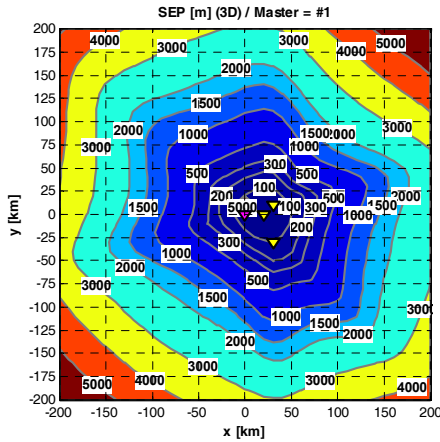


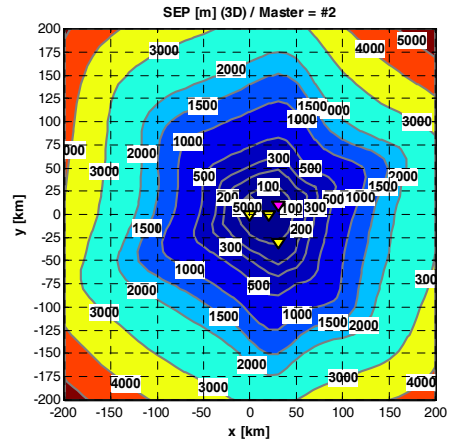
그림 8. 주수신기 선택에 따른 PDOP 분포
Fig. 8. PDOP distribution according to Master selection

시각동기화를 수행하기 위해서는 다수의 수신기 중에 하나를 주수신기(Master)로 설정하여 나머지 종수신기(Slave)의 시간을 보정하기 위한 기준을 제공해야 하며, 이 때 선택되는 주수신기에 따라 목표의 위치추정 성능이 달라진다. 따라서 다수의 수신기 중에 최적의 수신기를 주수신기로 선택해야 고려하는 수신기 배치구조에서 최적의 위치탐지 성능을 도출할 수 있다. 본 논문에서는 다수의 수신기와 고려하는 전장 영역 간의 기하학적 위치에 따른 위치오차정보를 나타내는 DOP 정보를 이용하여 최적의 주수신기를 선택하는 기법을 제안하였다. 모의실험 결과, DOP 기반의 제안 기법으로 시각동기화를 위한 최적의 주수신기를

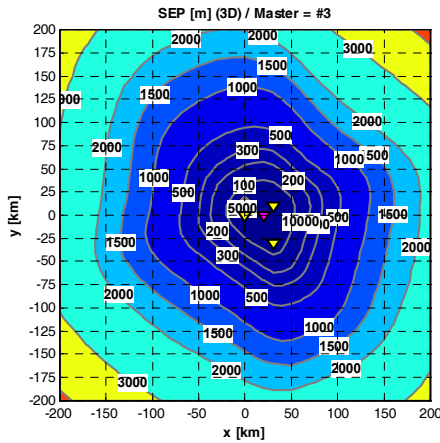
선택하는 경우, 2차원 또는 3차원 위치추정에서 가장 높은 위치추정정확도를 갖는 주수신기가 선택됨을 확인할 수 있었다. 또한, 본 논문에서 제안하는 최적의 주수신기 선택 기법을 적용하면 M&S를 통해 주수신기를 찾는 방법에 비해 그 수행시간이 매우 짧으며, 자동 분석이 용이하다는 장점이 있다. 일반적으로 이동형 수신기로 구성된 수동형 감시시스템의 특성 상, 다수의 수신기를 한 번 설치 후 자동 분석을 통해 시각동기화를 위한 주수신기를 선택하여 운용한다면, 시스템의 기동성 측면 및 운용인력 측면 등에서 매우 유용할 것으로 판단된다.



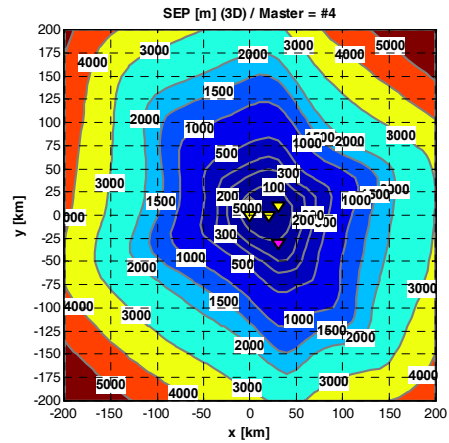
(a) 주수신기 : 1번 수신기
(a) Master : #1 Receiver



(b) 주수신기 : 2번 수신기
(b) Master : #2 Receiver



(c) 주수신기 : 3번 수신기
(c) Master : #3 Receiver



(d) 주수신기 : 4번 수신기
(d) Master : #4 Receiver

그림 9. 주수신기 선택에 따른 SEP 분포
Fig. 9. SEP distribution according to Master selection

References

[1] J. W. Kim and D. S. Eom, "TDOA-based practical localization using precision time-synchronization," *J. KICS*, vol. 38C, no. 2, pp. 141-154, Feb. 2013.

[2] R. B. Langley, "Dilution of Precision," *GPS world*, pp. 52-59, May 1999.

[3] S. J. Yoon, S. I. Lee, B. G. Park, and K. H. Song, "Error analysis on common-view time transfer: I," in *Proc. GNSS Workshop 2011*, vol. 18, no. C3, Jeju Island, Korea, Nov. 2011.

[4] L. Wei, et al., "Precision analysis of long baseline time comparison," *Software Engineering and Knowledge Engineering: Theory and Practice*, vol. 162, pp. 407-413, 2012.

[5] K. Madsen, H. B. Nielsen, and O. Tingleff, *Methods for Non-Linear Least Squares Problems*, 2nd Ed., Informatics and Math. Modeling (IMM), 2004.

[6] Y. T. Chan and K. C. Ho, "A simple and efficient estimator for hyperbolic location,"

IEEE Trans. Sign. Process., vol. 42, no. 8, pp. 1905-1915, Aug. 1994.

- [7] D. H. Kim, K. S. Hwang, and M. Ju, "Aircraft track estimation algorithm for MLAT system," *J. KICS*, vol. 39A, no. 2, pp. 117-119, Feb. 2014.
- [8] B. T. Fang, "Simple solutions for hyperbolic and related position fixes," *IEEE Trans. Aerosp. Electronic Syst.*, vol. 26, no. 5, pp. 748-753, Sept. 1990.
- [9] D. G. Kim, Y. H. Kim, J. W. Han, K. H. Song, and H. N. Kim, "Emitter geolocation based on TDOA/FDOA measurements and its analysis," *J. KICS*, vol. 38C, no. 9, pp. 746-756, Sept. 2013.
- [10] J. K. Lee, Y. J. Kim, and S. C. Kim, "Efficient localization algorithm for non-linear least square estimation," *J. KICS*, vol. 40, no. 1, pp. 88-95, Jan. 2015.
- [11] B. Li, A. Dempster, and J. Wang, "3D DOPs for positioning applications using range measurements," *Wirel. Sensor Netw.*, vol. 3, no. 10, pp. 334-340, 2011.
- [12] National Research Council, *The Global Positioning System: A Shared National Asset*, The National Academies Press, 1999.

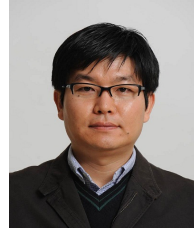
김 산 해 (Sanhae Kim)



2000년 : 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업
 2002년 : 숭실대학교 전자공학과 석사 졸업
 2010년 : 숭실대학교 전자공학과 박사 졸업
 2011년~현재 : 국방과학연구소 (ADD) 선임연구원

<관심분야> 전자전, 통신, 신호처리, 위치탐지

송 규 하 (Kyuha Song)



1996년 : 경북대학교 전자공학과 학사 졸업
 1998년 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사 졸업
 1998년~현재 : 국방과학연구소 (ADD) 책임연구원
 2012년~현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정

<관심분야> 신호처리, 패턴인식, 위치탐지

곽 현 규 (Hyungyu Kwak)



2007년 : 충남대학교 정보통신공학과 학사 졸업
 2009년 : 충남대학교 정보통신공학과 석사 졸업
 2009년~현재 : 국방과학연구소 (ADD) 선임연구원

<관심분야> 전자전, 통신, 신호처리, 위치탐지