

# UAV-BS에서 다운링크 전송 전력을 고려한 확장 칼만 필터 기반 동적 3차원 위치 추정 기법

강성헌\*, 박종호\*, 임재성<sup>o</sup>

## Dynamic 3D Localization of a UAV-BS Based on the Extended Kalman Filter Considering Downlink Transmit Power

Seongheon Kang\*, Jongho Park\*, Jaesung Lim<sup>o</sup>

요약

무선 통신이 발전함에 따라 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 기지국으로 활용하는 방안이 주목을 받고 있다. 특히 전장 환경과 같이 기지국 설치가 어렵고 통신사용에 제약이 있는 지역에서 다수의 사용자를 대상으로 UAV-BS(Unmanned Aerial Vehicle Base Station)를 적극적으로 활용할 수 있다. 지상 사용자의 작전환경에서도 통신서비스의 실시간성과 저 지연성을 만족하기 위해서는 UAV-BS의 위치 및 고도를 실시간으로 변경할 수 있어야 하며 이를 사용자의 이동성을 예측할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 지상 사용자의 움직임을 EKF(Extended Kalman Filter) 기반으로 예측하여 UAV-BS의 수평 위치를 결정한다. 또한 UAV 기동에 따른 에너지 효율성이 최적화되도록 UAV의 고도를 결정함으로써 UAV-BS의 3차원 위치를 실시간 갱신한다. 이를 위하여 UAV-BS와 사용자의 다운링크 경로에서 요구되는 최소 수신 전력을 활용하여 EKF의 측정 모델을 제안하고 수치 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 효과성을 평가하였다.

**Key Words** : Downlink pathloss, Wireless network, UAV-BS, Position estimation, Extended Kalman filter

### ABSTRACT

Recently, Unmanned Aerial Vehicle Base-Stations(UAV-BSs) are gaining popularity to provide wireless communications for various purposes. In particular, UAV-BSs can be actively utilized for a large number of users in areas where base station installation is difficult, inefficient, or restricted in communication use such as in battlefield environments. In order to satisfy the real-time and low-latency of continuous communication service in the environments where ground users move, it is necessary to predict the user's mobility to maintain the communication service quality and to change the location and altitude of the UAV-BS in real time. In this paper, the horizontal position of the UAV-BS is determined by predicting the movement of the ground user based on the EKF(Extended Kalman Filter). In addition the 3D position of the UAV-BS is updated in real time through vertical maneuvering by determining the altitude to maximize energy efficiency. To this end, the EKF measurement model was proposed using the minimum received power required in the downlink path of the UAV-BS and the user, and the effectiveness of the proposed method was evaluated through numerical simulations.

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2007112).

• First Author : Ajou University Department of Military Digital Convergence, harry3792@naver.com, 정회원

o Corresponding Author : Ajou University Department of Military Digital Convergence, jaslim@ajou.ac.kr, 종신회원

\* Ajou University Department of Military Digital Convergence, parkjo05@ajou.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202204-056-A-RN, Received April 21, 2022; Revised December July 13, 2022; Accepted July 21, 2022

## I. 서 론

최근 무선 통신 기술의 발전과 함께 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)을 셀룰러 기지국으로 활용하는 방안이 주목을 받고 있다. UAV는 각종 비상 상황에서 신속하게 임무에 투입될 수 있는 특징과 하늘에서 지상 사용자들에게 쉽게 LoS(Line-of-Sight)를 확보할 수 있는 특징으로 기지국 설치가 힘들거나 비효율적이고 또는 통신사용에 제약이 많은 지역에서 다수 사용자를 대상으로 UAV-BS(Unmanned Aerial Vehicle Base Station)를 적극적으로 활용할 수 있다<sup>[1]</sup>. 특히 전장 환경과같이 특수한 환경에서 무선 통신 네트워크가 필요한 경우에는 사용자의 이동성을 지원하는 끊임없는 무선 통신 네트워크의 운용 능력이 요구되기에 이를 위한 UAV-BS의 최적 배치와 실시간 갱신을 위한 연구가 필요하다. 또한 UAV-BS의 에너지 효율적인 운용이 동시에 요구되기에 고도 결정 시에 최적 소비전력 효율성 등이 포함되어야 한다.

하지만 사용자 그룹의 이동성을 고려하여 UAV-BS가 실시간으로 기동하는 트래킹 방법에 관한 연구는 진행되지 않았다. 또한 지상 사용자 그룹의 이동성 예측과 관련한 선행연구 역시 [6]의 저자와 같이 기본적으로 Kalman Filter(KF)에 기반하고 있기에 비선형적인 이동성을 갖는 경우에는 예측 오차가 크다. 이러한 예측 오차를 줄이기 위해서 KF의 갱신 주기를 단축하면 UAV-BS의 운용이 복잡해지고 에너지 소비 측면에서 비효율성이 발생한다.

UAV-BS를 활용 시 지상 사용자와 UAV-BS 간 통신에서 소비전력 최소화를 위한 UAV-BS의 최적 배치에 관한 여러 연구가 진행되었다. [2]의 저자는 UAV-BS의 통신서비스 반경을 기반으로 UAV-BS의 최적 고도를 결정하는 기법을 제시하고, UAV-BS와 지상 사용자 사이 전파경로 손실 모델을 활용하여 LoS 확률을 모델링하고 LoS 통신을 위한 최적의 고도각을 찾았다. [3]의 저자는 통신 반경을 최소화하면서 서비스 가능한 사용자 수의 최대화를 목적으로 사용자들의 위치 정보를 활용하여 사용자에게 최소로 요구되는 송신 전력을 찾을 수 있는 최대 커버리지 기법을 제안하였다. 이 외에도 [4-5] 등에서는 사용자들의 위치를 고정하거나 이동한 후의 상황을 가정하고 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 통신 환경에서 소비 전력을 최소화하는 에너지 효율적인 UAV-BS의 운용 방안 연구를 진행하였다.

따라서 본 논문에서는 위와 같은 문제점을 해결하고자 UAV-BS의 동적 3차원 위치 결정 기법을 제안

한다. 제안 기법은 Extended Kalman Filter(EKF)를 활용하여 지상 사용자의 이동성을 예측하는 기법으로 3단계로 구성된다. 1단계에서는 UAV-BS가 지상 사용자들의 정보를 측정 및 수신하여 EKF를 적용해 비선형적 움직임이 큰 지상 사용자의 다음 위치를 추정한다. 특히 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 다운링크 전송 전력을 측정하여 EKF 추정 모델에 반영함으로써 UAV-BS 운용의 에너지 효율성이 증대되고 사용자 이동성의 예측 오차를 감소하도록 했다. 2단계에서는 1단계에서 추정한 위치를 기반으로 지상 사용자 그룹의 중심점과 이를 통해 지상 사용자 그룹에게 지원할 지상 통신 반경을 결정하여 UAV-BS의 수평 위치를 결정한다. 3단계에서는 앞서 결정한 지상 사용자 그룹 통신 반경과 중심점을 기반으로 UAV-BS의 에너지 효율성을 고려하여 UAV-BS의 고도를 결정한다. 제안하는 UAV-BS의 실시간 위치 갱신 기법을 통해서 그룹 이동성을 가지는 사용자들에게 지속적인 통신서비스 제공이 가능함을 MATLAB 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델을 설명하고 3장에서는 제안 기법을 기술한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 기법의 성능을 검증하고 마지막으로, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 UAV-BS를 활용하여 n개의 지상 노드를 대상으로 무선 통신 서비스를 제공하고자 한다. 각 지상 노드 i의 좌표는  $(x_i, y_i)$ 로 설정하며 UAV-BS의 위치는  $(x_b, y_b, z_b)$ 로 설정한다.

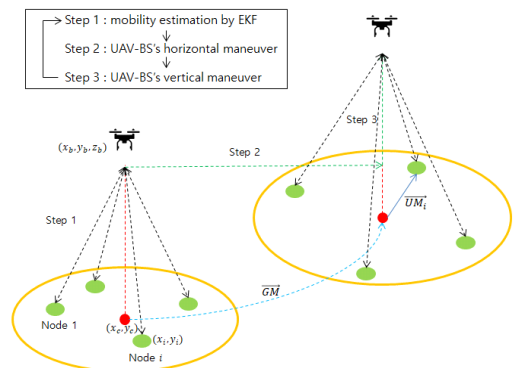


그림 1. 제안 기법 시스템 모델  
Fig. 1. System model of proposed scheme

모든 지상 노드들은 하나의 그룹을 형성하며 이동한다고 가정한다. 또한 UAV-BS는 그룹의 이동성을 예측하여 실시간으로 수평 및 수직 기동이 가능하다. 또한 전장 환경에서 지상 사용자들은 상태정보를 주기적으로 교환한다는 것을 고려하여 UAV-BS는 각 지상 노드들로부터 속도도, 각속도 및 방향에 대한 정보를 주기적으로 수신한다고 가정한다. 그룹 중심점은 그룹의 전체 이동성을 대표하는 지점을  $(x_c, y_c)$ 로 설정한다. 중심점으로부터 거리가 가장 멀리 떨어져 있는 지상 노드와의 거리를 통신 반경  $R$ 로 정의한다.

전장과 같은 운용 환경에서는 지상 사용자 다수가 하나의 그룹으로 비슷한 이동성을 보이며 함께 작전 임무를 수행하는 경우가 일반적이다. 따라서 본 논문에서는 사용자들의 그룹 이동성을 도입하고자 한다. 지상 사용자의 이동 상태를 속도도, 각속도, 방향각도 총 3가지 변수로 설정하고 각각  $w, v, \theta$ 로 표현하면 지상 사용자의 개별 이동성 모델은 다음과 같이 주어진다.

앞서 설명한 것처럼 지상 사용자들의 그룹 이동성을 반영하기 위하여 사용자 노드  $i$ 의 이동성 수식을 다음 식으로 정의한다.

$$\overrightarrow{M}_i = a \overrightarrow{GM} + (1-a) \overrightarrow{UM}_i \quad (2)$$

여기서  $\overrightarrow{GM}$ 은 그룹 전체의 평균 이동성을 의미하며  $a$ 는 그룹 이동성을 반영하기 위한 가중치이다. 즉  $a$ 가 1에 가까울수록 그룹 내 사용자의 이동성은 일치하게 되며  $a$ 가 0에 가까울수록 사용자들은 그룹 이동성보다는 개별 이동성을 중심으로 이동하는 것을 의미한다.

### III. 제안 기법

#### 3.1 Extended Kalman Filter 모델

본 논문에서는 지상 사용자의 이동성을 예측하기 위해 EKF를 적용한다. 우선 KF는 잡음이 포함되어 있는 측정치를 바탕으로 선형 역학계의 상태를 추정

하는 재귀 필터이다. 즉 초기값을 선정한 후 추정값과 오차 공분산을 예측하고 이를 통해 칼만 이득을 계산 후 추정값을 계산하고 오차 공분산을 계산하는 단계를 반복하는 단계를 의미한다. 이때 비선형적인 역학계의 상태를 추정하기 위하여 비선형적인 역학계 상태의 매 순간을 미분하여 선형시스템으로 바꾼 필터를 EKF 라고 한다. 해당 EKF에 대한 내용은 [8]을 통해 확인된다. 이를 위해서는 지상 사용자의 상태를 나타내는 상태 함수와 이를 제어하는 제어 함수가 필요하다. 이는 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} X(k) &= [x(k), y(k), \theta(k)]' \\ U(k) &= [v(k), w(k)]' \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $X(k)$ 는 상태 함수로 각 항은 순서대로 지상 노드의 x축 좌표, y축 좌표, x축 기준 방향 각도로 설정한다.  $U(k)$ 는 제어 함수로 각 항은 순서대로 지상 노드의 속도도와 각속도로 설정한다. 시간이 지남에 따라 지상 사용자의 상태 함수의 값은 달라지는데 이를 상태 천이 함수로 나타내면 지상 사용자의  $(k+1)$ 번째의 상태를  $(k)$  번째의 상태를 활용하여 다음과 같이 표현된다.

EKF는 KF와 달리 비선형성 이동성을 예측해야 하므로 비선형적인 식을 선형적인 식으로 근사화할 필요가 있다. (4)의 상태 천이 함수를 EKF에 적용하기 위해서 상태 천이 함수를 각 요소로 편미분 한 야코비안 행렬로 변환하여 얻을 수 있다. 야코비안 행렬은 다음 식과 같이 표현된다.

여기에서  $\Delta t$ 는 EKF의 갱신 주기를 의미하며 (4)의 상태 천이 함수를 (3)의 각 요소로 편미분 하여  $3 \times 3$ 의 행렬이 생성된다.

EKF에 사용될 측정 함수는 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 x축 수평거리, y축 수평거리, 다운링크 전송 전력을 변수로 설정하며 다음과 같이 표현된다.

(6)에서의  $f, c, mx, my$ 는 각각 반송 주파수, 빛의 속도, UAV-BS의 x좌표 위치, UAV-BS의 y좌표

$$\overrightarrow{UM} = \left( \frac{v}{w} (\sin(\theta + w\Delta t) - \sin\theta), \frac{v}{w} (\cos\theta - \cos(\theta + w\Delta t)) \right) \quad (1)$$

$$F(X(k), U(k)) = \begin{bmatrix} x(k) - \frac{v(k)}{w(k)} \sin\theta(k) + \frac{v(k)}{w(k)} \sin(\theta(k) + w(k)dt) \\ y(k) + \frac{v(k)}{w(k)} \cos\theta(k) - \frac{v(k)}{w(k)} \cos(\theta(k) + w(k)dt) \\ \theta(k) + w(k)dt \end{bmatrix} \quad (4)$$

위치를 의미한다.  $P_r$ 은 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 통신을 위한 수신기의 최소 요구 전력을 의미한다. UAV-BS의 전송 전력을 최소화하기 위해 UAV-BS의 전송 전력이 수신기의 최소 요구 전력과 일치한다고 가정한다. 노드  $i$ 의 수신 전력은 경로손실에 따라 달라지기 때문에, UAV-BS와 노드  $i$  사이의 다운링크 전송 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>9)</sup>.

$$P_{t,i} = P_r \cdot PL(d_i) \quad (7)$$

(7)을 통해 (6)의 첫 번째 항의 수식이 도출된다. 수식  $P_r$ 은 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 통신을 위한 수신기의 최소 요구 전력을 의미하며  $PL(d_i)$ 는 거리에 따른 경로 손실 값을 의미한다. 또한 (6)의 측정 함수 역시 상태 천이 함수와 같이 EKF에 적용하기 위해 야코비안 행렬이 필요하며 이는 다음과 같이 표현된다.

위에서 도출한 행렬 및 함수를 이용하여 본 논문에서 제시하는 EKF의 알고리즘은 그림 2와 같다. 본 알고리즘에서의  $R(k+1)$  변수는 센서의 노이즈 값을 의미한다.

### 3.2 UAV-BS 수평 기동 결정

3.1 절에서 기술한 지상 사용자들의 이동성 예측 알고리즘을 활용하여 UAV-BS의 수평 기동을 결정해야 한다. 이를 위해서 지상 사용자들로 구성된 그룹의 중심점을 결정하고 통신 반경을 결정해 주어야 한다.

지상 사용자 그룹의 중심점은 시스템 모델에서 정의한 지상 사용자의 위치 좌표 추정값을 활용한다. 모든 지상 사용자들 사이의 거리를 측정할 후 가장 거리가 멀리 떨어져 있는 두 지상 사용자를 결정한다. 이

Algorithm 1 Extended Kalman Filter Algorithm for estimating ground user's location

1. Initialize :  $X_0, P_0, u(k), z(k)$
2. Repeat
3.  $X(k+1|k) = F(x(k), u(k))$
4.  $P(k+1|k) = \nabla F \cdot P(k|k) \cdot \nabla F^T + R(k+1)$
5.  $K(k+1) = P(k+1|k) \cdot H(k+1)^T (H(k+1) \cdot P(k+1|k) + H(k+1)^T + Q(k+1))^{-1}$
6.  $X(k+1|k+1) = X(k+1|k) + K(k+1) \cdot (z(k+1) - h(X(k+1|k)))$
7.  $P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1) \cdot H(k+1) \cdot P(k+1|k)$
8. Until Mission is completed

그림 2. 위치 추정을 위한 확장 칼만 필터 프로그램  
Fig. 2. System Extended Kalman Filter Algorithm for estimate

는 다음 식을 활용하여 결정된다.

$$(i, j) = \operatorname{argmax}_{(i,j)} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (9)$$

(9)를 활용하여 서로 가장 멀리 떨어져 있는 두 지상 사용자를 확인한 후 해당 지상 사용자들의 중심점을 그룹 중심점으로 결정한다. 이는 거리를 측정하고자 하는 두 지점을 각각  $i$ 와  $j$ 로 지정 후 각 지점의 좌표를 각각  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$ 로 설정하여 이를 활용하여 결정된다.

$$(x_c, y_c) = \left( \frac{x_i + x_j}{2}, \frac{y_i + y_j}{2} \right) \quad (10)$$

$$\nabla F(k+1) = \frac{\partial F(X(k), U(k))}{\partial X(k)} = \begin{bmatrix} 10 - \frac{v(k)}{w(k)} \cos \theta(k) + \frac{v(k)}{w(k)} \cos(\theta(k) + w(k) \Delta t) \\ 0 \ 1 - \frac{v(k)}{w(k)} \sin \theta(k) + \frac{v(k)}{w(k)} \sin(\theta(k) + w(k) \Delta t) \\ 0 \ 0 \ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Z(k) = \begin{bmatrix} P_r \left( \frac{4\pi f}{c} \sqrt{(m_x - x(k))^2 + (m_y - y(k))^2 + h^2} \right)^2 \\ m_x - x(k) \\ m_y - y(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$H(k) = \frac{\partial Z(k)}{\partial X(k)} = \begin{bmatrix} 2 \frac{16\pi^2 f^2 P_r}{c^2} d_i \frac{\partial d(k)}{\partial x(k)} & 2 \frac{16\pi^2 f^2 P_r}{c^2} d_i \frac{\partial d(k)}{\partial y(k)} & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

표 1. 시뮬레이션 변수  
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Number of users ( $N$ )	20
Simulation run time	100sec
Filter update cycle ( $\Delta t$ )	1sec
Ground user's speed	0~30m/sec
Minimum required power ( $P_r$ )	-70dBm
Carrier frequency ( $f_c$ )	2000MHz
Group cohesion ( $a$ )	0~1
Suburban environment ( $A, B, \eta_{LoS}, \eta_{NLoS}$ )	5.2, 0.35, 0.1, 21
Urban environment ( $A, B, \eta_{LoS}, \eta_{NLoS}$ )	10.6, 0.18, 1, 20
Dense urban environment ( $A, B, \eta_{LoS}, \eta_{NLoS}$ )	11.95, 0.14, 1.6, 23

그룹 중심점이 UAV-BS의 수평 위치의 결정점이 되며 해당 좌표를 향해 수평 기동을 진행한다.

UAV-BS의 수평 기동을 결정한 후 지상 사용자 그룹의 통신 반경을 설정한다. 이는 결정된 그룹 중심점으로부터 거리가 가장 먼 지상 사용자 사이의 거리를 반경으로 설정하며 다음 식으로 주어진다.

$$r = \max(\sqrt{(x_c - x_i)^2 + (y_c - y_i)^2}) \quad (11)$$

### 3.3 UAV-BS 수직 기동 결정

본 논문에서는 [5]에서 제시한 Air-to-Ground (A2G) 채널 모델을 활용한다. LoS(Line of Sight)와 NLoS (None Line of Sight) 환경이 발생하게 될 확률을 나타내는 확률모델은 각각 다음과 같이 표현된다.

여기에서 A, B는 교외 환경, 도시 환경, 밀집 도시 환경과 같은 지상 환경에 따른 변수이다. 그리고 r은 지상 사용자 그룹의 통신 반경으로 (11)에서 도출한 값이며 h는 UAV-BS의 고도이다.

또한 A2G 모델에서 UAV-BS의 송신신호가 지상 사용자에게 전파되기까지 추가적인 경로 손실이 거리

와 지상 환경에 따라 추가된다. 추가적인 경로 손실은 LoS와 NLoS 환경에 크게 영향을 받는다. 따라서 각 환경에서의 추가적인 경로 손실은 다음과 같이 표현된다.

$$FSPL = 20 \log \left( \frac{4\pi f_c d}{c} \right) \\ L_\epsilon = FSPL + \eta_\epsilon \quad (\epsilon = LoS, NLoS) \quad (13)$$

(13)에서 FSPL은 자유공간에서 발생하는 경로 손실이며  $\eta_\epsilon$ 은 환경에 따른 추가 경로 손실이다.  $f_c$ 는 반송파 주파수를 의미하며  $c$ 는 빛의 속도,  $d$ 는 지상 사용자와 UAV-BS 사이의 거리를 의미한다. 이를 통해 최종적인 LoS와 NLoS 환경에서의 추가적인 경로 손실 값인  $L_\epsilon$ 을 도출하게 된다. 실제 통신 과정에서는 LoS와 NLoS 환경을 동시에 고려한 평균 경로 손실이 필요하며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$L = \Pr_{LoS} L_{LoS} + \Pr_{NLoS} L_{NLoS} \quad (14)$$

(14)에 (12), (13)을 대입시켜 정리하면 다음과 같이 평균 경로 모델 식 도출이 가능하다.

(15)는 UAV-BS와 지상 사용자 그룹의 통신 반경인 r과 UAV-BS의 고도 h로 이루어진 함수이다. 셀 반경 r은 (11)을 통하여 도출하였기 때문에 UAV-BS 고도 h는 (15)을 최소로 하는 높이로 구해진다. 그 외의 변수들은 (13)과 동일하게 적용되어 결과값이 도출된다.

## IV. 성능 분석

본 절에서는 MATLAB을 활용한 시뮬레이션을 통해서 제안하는 기법의 성능을 분석하였다. 이를 위하여 성능 지표는 제안 기법으로 측정된 지상 사용자의 이동성 추정값과 실제값 사이의 오차를 나타내는 평균 절대 편차(MAD: Mean Absolute Deviation)를 활

$$\Pr_{LoS}(r, h) = \frac{1}{1 + A \exp(-B(\frac{180}{\pi} \arctan(\frac{h}{r}) - A))} \\ \Pr_{NLoS}(r, h) = 1 - \Pr_{LoS}(r, h) \quad (12)$$

$$L(r, h) = 20 \log \left( \frac{4\pi f_c d}{c} \right) + \frac{\eta_{LoS} - \eta_{NLoS}}{1 + A \exp(-B(\frac{180}{\pi} \arctan(\frac{h}{r}) - A))} \quad (15)$$

용한다. 이는 시뮬레이션 실행 시 발생하는 추정값과 실제값 사이에서 나타나는 특이값의 영향을 적게 받고 전체적인 예측 정확도를 쉽게 파악하기 위해 MSE(Mean Squared Error) 대신 MAD를 사용한다.

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - P_t|}{n} \quad (16)$$

시뮬레이션에서 활용한 매개 변수는 표 1과 같다. 본 논문에서 제안하는 기법을 3가지 다른 환경에서 평가했다. 즉, 교외(suburban), 도시(urban), 밀집 도시(dense urban)로 구분되며 표 1에 주어진 환경 변수를 활용하였다. 또한 각 시뮬레이션은 100초씩 총 500회 진행하여 평균값을 비교하였다.

그림 3은 제안하는 다운링크 전송 전력을 고려한 EKF 측정 모델의 효과성을 평가하기 위하여 MAD 값을 나타낸 결과이다. UAV-BS와 지상 사용자 사이의 x축, y축 수평거리만 포함하였을 경우 MAD 값이 계속 증가하여 100초 후에 약 4m까지 증가하였으며, 측정 모델에 x축, y축, 유클리드 거리를 포함하였을 때는 평균적으로 약 0.36m의 MAD 값을 보였다. 한편, 본 논문에서 제안하는 측정 모델은 x축, y축 거리와 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 다운링크 전송 전력을 포함하는 경우로 MAD 값이 약 0.065m 정도의 매우 우수한 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안 기법을 통해서 매우 정확한 수준으로 지상 사용자의 이동성을 예측 가능함을 확인하였다.

그림 4는 제안하는 기법을 교외, 도시, 밀집 도시 총 3가지 환경에서 MAD 값의 결과이다. 그래프를 확

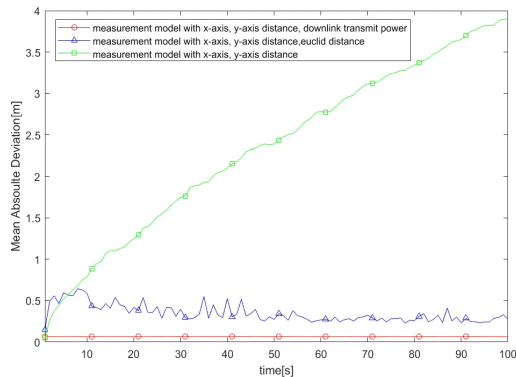


그림 3. Extended Kalman Filter의 측정 모델 내 변수에 따른 MAD 값  
Fig. 3. MAD values according to parameter in the measurement model of the Extended Kalman Filter

인할 때 교외 환경에서 가장 낮은 약 0.063m의 MAD 값을 가졌다. 도시 환경에서는 약 0.136m의 MAD 값, 밀집 도시 환경에서는 약 0.195m의 MAD 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 교외 환경, 도시 환경, 밀집 도시 환경 순으로 LoS 환경이 될 확률이 커지기 때문에 나타나는 결과임을 확인할 수 있다.

그림 5의 결과는 EKF의 갱신 주기를 각각 0.5초, 1초, 5초로 설정하였을 때 나타난 MAD 값 그래프이다. 갱신 주기가 0.5초일 때와 1초일 때 차이가 약 0.04m 정도 차이가 나지만 0.5초로 설정하면 알고리즘 수행을 위한 시스템 부하가 증가할 위험성이 있고 또한 빈번한 통신으로 인하여 소비 에너지 측면에서 비효율적이다. 따라서 갱신 주기를 1초로 설정하더라도 EKF를 적용하여도 큰 오차 없이 지상 사용자의 이동성이 충분히 예측 가능하다는 것을 확인하였다. 갱신 주기가 5초인 경우에는 지상 사용자와 UAV-BS의 이동 사이의 메시지 교환 간격이 상당히 길어짐에 따라, 오차값이 증가한다. 하지만 이 경우에도 만약 오차 범위를 0.2m로 허용한다면 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

그림 6은 KF와 EKF를 적용하였을 때의 결과 그래프이다. 모두 측정 모델에는 x축 거리와 y축 거리만을 포함하였으며 EKF의 갱신 주기는 1초로 설정하였다. KF와 EKF 모두 갱신 주기를 1초로 설정하였을 경우 시간이 지남에 따라 MAD 값의 차이가 크게 발생하였으며 KF의 갱신 주기를 0.1초로 단축하더라도 MAD 값은 EKF의 값이 비하여 개선되지 못함을 확인되었다. 따라서 KF보다는 EKF를 적용하는 것이 훨씬 정확하게 추정된다는 것을 확인하였다.

그림 7은 지상 사용자 그룹의 이동 유형에 따른 성

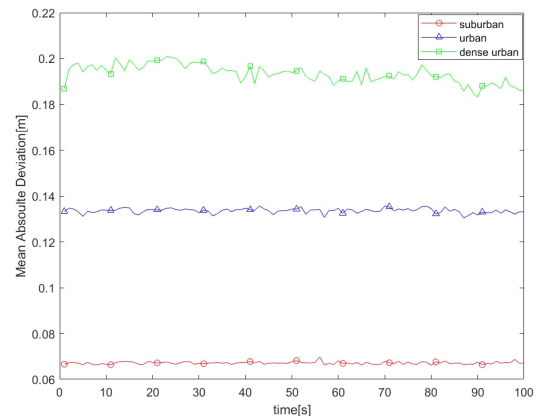


그림 4. 환경 변수에 따른 제안 기법의 MAD 값  
Fig. 4. MAD values of proposed method according to the environment variable

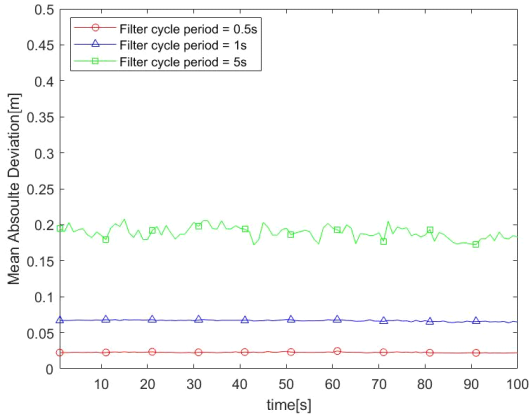


그림 5. 필터의 갱신 주기에 따른 MAD 값  
Fig. 5. MAD values according to Extended Kalman Filter update cycle period

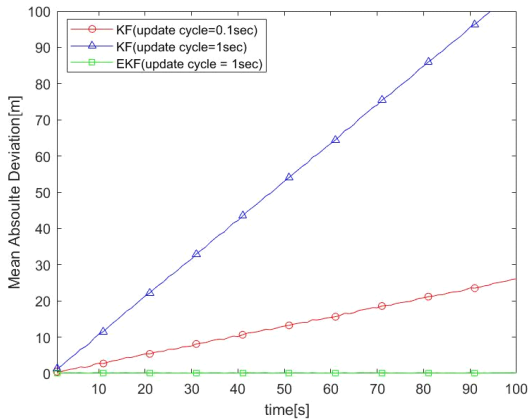


그림 6. 칼만 필터와 확장 칼만 필터의 MAD 값  
Fig. 6. MAD values according to Kalman Filter and Extended Kalman Filter

능을 평가하기 위한 것이다. 이를 위하여 그룹 이동성을 직선과 곡선 운동으로 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. 그룹 이동성이 직선인 경우는 회전 각도가  $0^\circ$ 이며, 곡선은 회전 각도가  $0^\circ \sim 45^\circ$  와  $45^\circ \sim 90^\circ$  의 범위에서 각각 랜덤하게 결정되도록 하였다. 지상 사용자 그룹이 직선 운동을 할 때가 MAD 값이 가장 낮게 유지되며 곡선 운동인 경우는 회전 각도가 클수록 MAD 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 회전 각도가 가장 큰 경우에도 MAD 값은 약 0.16m의 작은 값으로 유지되어 그룹의 회전 이동성이 큰 경우에도 큰 오차 없이 예측 가능함을 확인하였다.

그림 8은 그룹 이동성의 응집도 변화에 따른 지상 사용자의 이동 경로를 xy 평면에 나타낸 결과이다. 이

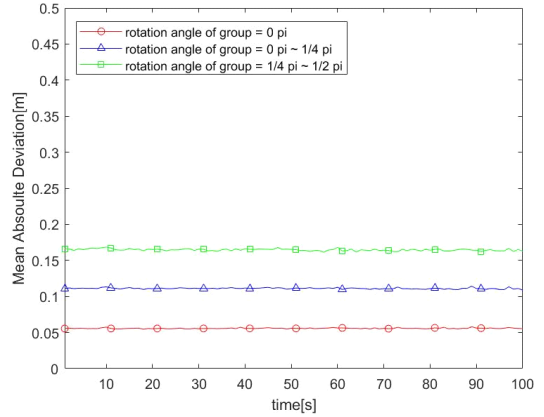


그림 7. 지상 사용자 그룹 이동성의 회전 각도에 따른 MAD 값  
Fig. 7. MAD values according to rotation angle of ground user's group mobility

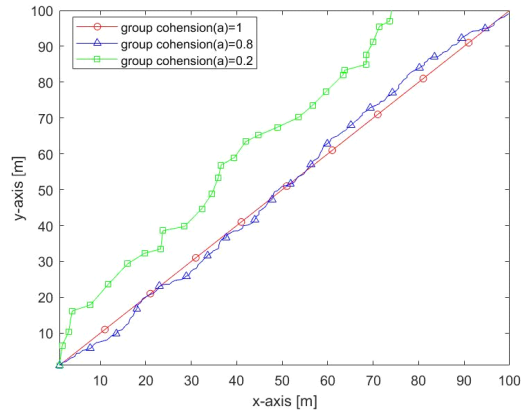


그림 8. 그룹 응집도에 따른 지상 사용자 이동성  
Fig. 8. Ground user's mobility according by group cohesion values (a)

때 그룹 이동성은 일정한 속도로 직선 운동을 하는 것으로 설정하였다. 그룹 응집도가 커질수록 그룹의 직선 경로를 따라 이동하며 그룹 응집도가 작아질수록 지상 사용자 개인의 이동성이 더 크게 반영되기에 그룹의 직선 이동 경로로부터 멀어지는 형태를 확인할 수 있다.

그림 9의 결과는 그룹 응집도에 따른 MAD 값을 나타낸 그래프이다. 그룹 응집도 변수 a 값을 각각 0.2, 0.5, 0.8로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 결과 그래프를 확인해 보면 그룹 응집도가 클수록 지상 사용자 전체가 비슷한 이동성을 보이므로 MAD 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

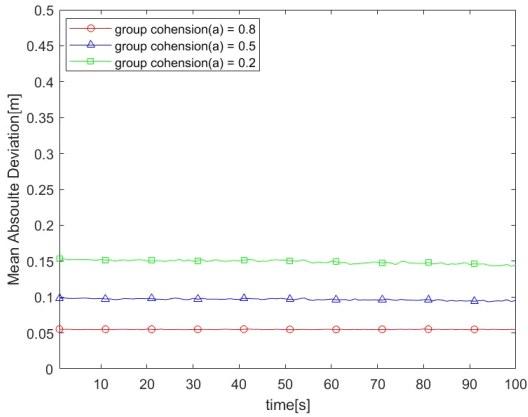


그림 9. 그룹 응집도에 따른 MAD 값  
Fig. 9. MAD values according to group cohesion values

### V. 결론

본 논문에서는 단일 UAV-BS를 활용하여 지상 사용자들의 이동환경에서도 적용 가능한 UAV-BS의 3차원 위치 결정 방식을 제안하였다. 제안 기법은 지상 사용자의 이동성 예측 시에 UAV-BS와 지상 사용자 사이의 다운링크의 전력을 반영한 EKF 추정 모델을 제안하였다. 이를 기반으로 UAV-BS의 에너지 효율성을 고려하여 UAV-BS의 고도를 결정하였다.

EKF 기반한 UAV-BS 3D 위치 추정기법의 타당성을 입증할 위하여 다양한 시뮬레이션을 수행하고 평가하였다. 먼저 제안하는 EKF 추정 모델의 유용성을 검증하였고, MAD 평가를 통해서 LoS 조건을 만족하는 환경일수록 더 정확한 성능을 보이고, EKF의 갱신 주기가 5초 정도로 증가하여도 오차가 크지 않음을 확인하였다. 또한 비선형적인 그룹 이동성 환경에서도 비교적 낮은 오차를 유지할 수 있음을 입증하였다.

### References

[1] L. Bin, Z. Fei, and Y. Zhang, "UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2241-2263, Dec. 2018. (<https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2887086>)

[2] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Jun. 2014.

(<https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736>)

[3] M. Alzenad, A. El-Keyi, F. Lagum, and H. Yanikomeroglu, "3-D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy efficient maximal coverage," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 6, no. 4, pp. 434-437, Apr. 2017. (<https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2700840>)

[4] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, "Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016. (<https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510820>)

[5] W. Lei, B. Hu, and S. Chen, "Energy efficient placement of a drone base station for minimum required transmit power," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 2010-2014, 2018. (<https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2808957>)

[6] H. Feng, C. Liu, Y. Shu, and O. W. Yang, "Location prediction of vehicles in VANETs using a Kalman filter," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 80, no. 2, pp. 543-559, 2015. (<https://doi.org/10.1007/s11277-014-2025-3>)

[7] X. Hong, M. Gerla, G. Pei, and C. Ching-Chuan "A group mobility model for ad hoc wireless networks," in *Proc. 2nd ACM Int. Wkshp. Modeling, Anal. and Simulation of Wireless and Mob. Syst.*, pp. 53-60, 1999.

[8] K. Fuji, "Extended Kalman filter," Reference Manual, pp. 14-22, 2013.

[9] J. Park, H. Baek, S. Choi, and J. Lim, "Power-efficient UAV base station placement considering position and accessibility of individual nodes," *J. KICS*, vol. 46, no. 1, pp. 66-73, 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.1.66>)



**강 성 현 (Seongheon Kang)**



2022년 2월 : 아주대학교 국방  
디지털융합학과 학사  
2022년 6월~현재 : 공군소위  
<관심분야> UAV, UAV-BS,  
칼만 필터, 위치 추정  
[ORCID:0000-0003-1646-6975]

**임 재 성 (Jaesung Lim)**



1983년 2월 : 아주대학교 전자  
공학 학사  
1985년 2월 : KAIST 영상통신  
석사  
1994년 8월 : KAIST 디지털통  
신 박사  
1995년 9월~1998년 2월 : SK 텔  
레콤 중앙연구원 책임연구원  
1998년 3월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과  
정교수  
2006년 8월~현재 : 아주대학교 국방기술네트워크 연  
구센터장  
<관심분야> 이동 및 위성통신, 무선네트워크, 국방  
전술통신  
[ORCID:0000-0003-0080-9398]

**박 종 호 (Jongho Park)**



2010년 2월 : 서울대학교 기계  
항공공학부 학사  
2012년 2월 : 서울대학교 기계  
항공공학부 석사  
2016년 8월 : 서울대학교 기계  
항공공학부 박사  
2016년 10월~2019년 8월 : 국  
방과학연구소 선임연구원  
2019년 9월~현재 : 아주대학교 국방디지털융합학과  
조교수  
<관심분야> 항공유도제어  
[ORCID:0000-0001-5406-0306]