

# 비계층 클러스터 방식을 활용한 다중 UAV 전력 소모 최소화 위치 선정 기법

조준우\*, 김재현<sup>o</sup>

## Multi-UAV Positioning Selecting Scheme for Minimizing Power Consumption Using Non-Hierarchical Cluster Method

Jun-Woo Cho\*, Jae-Hyun Kim<sup>o</sup>

요약

Unmanned Aerial Vehicle (UAV)는 유연하고 신속하게 이동 가능하기 때문에, 이동 기지국으로 활용하려는 방안이 연구되고 있다. 그러나 UAV는 연료 등으로 동작하기 때문에, 이동 기지국으로 활용하기 위해서는 전력 소모를 최소화하는 UAV 위치 선정 연구가 필요하다. 본 논문에서는 다양한 데이터율을 가진 지상 사용자들의 통신 지원을 위한 다중 UAV 위치 선정 방안을 제시한다. UAV와 지상 사용자의 전력 관계를 통해 UAV들의 전력 소모를 최소화하는 최적화 모델링을 수행하고, 비계층 클러스터 분석을 활용하여 다중 UAV의 위치 최적 근사값을 도출하였다. 성능 평가를 통해 비계층 클러스터 분석 방법이 Particle Swarm Optimization (PSO) 알고리즘에 비해, 더 좋은 근사 최적 위치를 도출하는 것을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : UAV, Power consumption, Clustering, Optimization theory, Positioning

### ABSTRACT

Since Unmanned Aerial Vehicle (UAV) can move flexibly and quickly, it has been recently studied to use it as a mobile base station. However, the location of UAV with minimum power consumption should be considered because it operates with the limited fuel or battery. In this paper, we propose the deployment of Multi-UAV for minimizing power consumption when the ground users have varying data rate. We first derive optimization model considering the power consumption relationship between UAV and ground users, and then find the near-optimal position of multi-UAV using the non-hierarchical method. The performance results show that the non-hierarchical method can find more precise positions of multi-UAV as compared with that of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm.

### I. 서론

Unmanned Aerial Vehicle (UAV)는 목표 지점에 유연하고 신속하게 배치 가능하기 때문에, 통신망

구성이 어렵거나 파괴된 지역에서도 기지국의 역할을 수행할 수 있다. 하지만 UAV는 기존의 기지국과는 달리 연료 또는 2차 전지로 전력을 공급 받기 때문에, 지속적으로 통신 서비스를 제공하기 어렵다. 따라서

\* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD160070BD)

• First Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, cjw8945@ajou.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 중신회원  
논문번호 : 201806-C-016-RN, Received May 30, 2018; Revised July 13, 2018; Accepted July 13, 2018

UAV를 이동 기지국으로 활용하기 위해서는 UAV의 전력 소모를 최소화 하는 방안을 고려해야 한다<sup>[1-3]</sup>.

UAV 위치 선정은 UAV의 전력 소모를 최소화 하는 방안 중 하나이다. [5]에서는 도시 환경에서 지상 사용자들이 랜덤하게 존재하는 환경을, [6]에서는 지상 Internet of Things (IoT) 장비들이 포아송 분포로 존재하는 환경을 고려하여, 전력 소모가 최소화 되는 UAV의 위치 선정 방안을 제안하였다. [7]에서는 지상 사용자와 UAV의 전력을 모두 고려하는 UAV 위치 선정 및 비행경로 설정 방안을 제안하였다. 그러나 [5-7] 연구에서는 사용자들의 데이터율을 고려하지 않거나, 모든 사용자들의 데이터율이 일정하다고 가정하고 있다<sup>[4-7]</sup>.

본 논문에서는 UAV의 전력 소모를 최소화 하면서 데이터율이 다양한 지상 사용자들의 통신을 지원하는 다중 UAV 위치 선정 방안을 제시한다. 이를 위해 UAV와 지상 사용자들 간의 전력 소모 관계를 통한 전력 소모 최적화 모델링을 수행하였으며, 비계층 클러스터 분석을 활용하여 다중 UAV의 위치 최적 근사값을 도출하였다. 성능 평가를 통해 비계층 클러스터 분석 방법이 Particle Swarm Optimization (PSO) 알고리즘에 비해, 더 좋은 근사 최적 위치를 도출하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려한 시스템 모델과 파라미터들을 정의한다. 3장에서는 2장의 시스템 모델을 바탕으로 최적화 모델링을 수행하고, 비계층 클러스터 분석을 적용하는 방안에 대해 소개한다. 4장에서는 3장의 알고리즘을 통해 도출된 결과를 제시하고, 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이  $U$  대의 동일 기종 UAV들이 모든 지상 사용자  $N$  명의 통신을 지원하는 시스템 모델을 고려한다. 이 때 UAV  $u$  ( $u \in U$ )로부

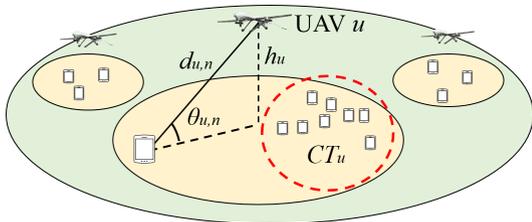


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1. System Model

터 통신을 지원 받는 지상 사용자들의 그룹을 클러스터  $CT_u$ 로 정의한다. UAV들과 사용자들은 이동성이 없이 서로 고정되어 있다고 가정하며, UAV의 고도를  $h_u$ , UAV와 지상 사용자와의 직선거리를  $d_{u,n}$ , 고각을  $\theta_{u,n}$ 로 각각 정의한다. 모든 UAV들은 자신들의 최대 부하인  $C_u$ 를 초과하지 않는 선에서 클러스터 내 지상 사용자들에게 대역폭  $B$ 를 할당한다. 또한 모든 지상 사용자들은 해당 시스템이 동작하는 동안에 고정 데이터율  $C_{g,n}$ 을 가지는 트래픽을 발생시킨다.

해당 시스템에서 활용한 UAV-지상 신호 감쇄 모델은 다음 절에 설명한다.

### 2.1 UAV-지상 신호 감쇄 모델<sup>[8,9]</sup>

UAV 이동 기지국은 3차원 공간 내에서 자유롭게 배치할 수 있기 때문에, 기존과는 다른 신호 감쇄 모델이 필요하다. 본 논문에서는 [8]에서 제안한 UAV-지상 신호 감쇄 모델을 활용하였다.

[8]에서 제안한 UAV-지상 신호 감쇄 모델은 International Telecommunication Union Radiocommunication sector (ITU-R)에서 권고한 전파 모델 예측 방법에 근거하여, UAV  $u$ 로부터 지상 사용자  $n$ 에 도달하는 Line of Sight (LoS) 신호의 존재 확률을 우선 도출한다. (1)은 LoS 신호 존재 확률을 나타낸 것이다.

$$P(LoS; \theta) = \frac{1}{1 + a \times \exp(-b[\theta_{u,n} - a])}, \quad (1)$$

$a$ 와  $b$ 는 각각 도시 환경 (시골, 소도시, 대도시 등)을 고려한 상수이며,  $\theta_{u,n}$ 은 고각으로 (2)와 같이 UAV  $u$ 와 지상 사용자  $n$ 의 2차원 평면상의 거리인  $r_{u,n}$ 과 고도  $h_u$ 를 통해 도출 할 수 있다.

$$\theta_{u,n} = \arctan\left(\frac{h_u}{r_{u,n}}\right). \quad (2)$$

[8]은 선행 연구인 [9]를 통해 UAV  $u$ 로부터 지상 사용자  $n$ 으로 향하는 신호 중 LoS 신호와 Non LoS (NLoS) 신호가 신호 감쇄에 강한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 통해 [8]에서는 지상 사용자가 수신하는 신호에는 앞선 두 신호만이 있다고 가정한 뒤, UAV-지상 신호 감쇄 모델을 (3)과 같이 정리하였다.

$$PL_{u,n} = \frac{L}{1 + a \exp(-b[\theta_{u,n} - a])} + 10 \log(d_{u,i}^2) + 20 \log(4\pi f / C) + \eta_{NLoS}, \quad (3)$$

$L$ 은 LoS 신호 평균값  $\eta_{LoS}$ 와 NLoS 신호 평균값  $\eta_{NLoS}$ 의 차로 계산된 값이며,  $f$ 는 주파수,  $C$ 는 빛의 속도이다.

### III. 최적화 모델링 및 최적해 도출 방안

#### 3.1 UAV-지상 전력 관계 및 최적화 모델링

##### 3.1.1 UAV-지상 전력 관계

본 논문에서는 UAV에서 지상 사용자로 향하는 하향 링크 시나리오를 활용하여, 먼저 클러스터  $CT_u$ 를 지원하기 위한 UAV  $u$ 의 출력 전력을 도출한다. 이때 UAV의 출력 전력은 UAV의 소모 전력과 같은 의미이다. 도출 과정은 사는 채널 용량을 활용하여 지상 사용자  $n$ 에 대한 UAV의 출력 전력을 구한 뒤, 클러스터 내 모든 지상 사용자들을 고려하여 모든 출력 전력을 합하는 순으로 진행한다<sup>10)</sup>.

UAV  $u$ 와 클러스터  $CT_u$  내의 지상 사용자  $n$ 의 사는 채널 용량은 (4)와 같다.

$$C_n = B \log \left( 1 + \frac{P_{t,u} / PL_{u,n}}{N_g + I_n} \right), \quad (4)$$

$B$ 는 지상 사용자  $n$ 에게 할당된 대역폭이며,  $P_{t,u}$ 는 UAV  $u$ 가 사용자  $n$ 을 지원하기 위한 출력 전력,  $N_g$ 는 가우시안 잡음,  $I_n$ 는 사용자  $n$ 이 UAV  $u$  이외의 다른 UAV  $j$  ( $j \in U, j \neq u$ )로 부터 받는 간섭이다.  $I_n$ 는 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$I_n = \sum_{j=1, j \neq u}^U \frac{P_{t,j}}{PL_{j,n} + N_g}. \quad (5)$$

(4)를 바탕으로 UAV  $u$ 의 출력 전력은 (6)과 같이 정리된다.

$$P_{t,u} = \sum_{n \in CT_u} 2^{C_n/B} \times (N + I_n) \times PL_{u,n}. \quad (6)$$

그림 2는 UAV 1대와 지상 사용자 50명이 같은 거리에 분포 되어 있는 환경에서, UAV의 고도와 UAV와 지상 사용자의 2차원 평면상의 거리에 따른 UAV의 출력 전력의 변화도를 나타낸 그래프이다. 이때 UAV와 지상 사용자들과의 2차원 평면상의 거리

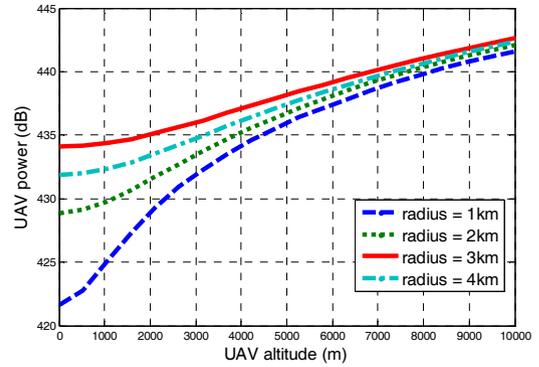


그림 2. UAV power 대 UAV 고도 및 UAV 반경  
Fig. 2. UAV power vs. UAV altitude vs. UAV coverage

는 UAV의 최대 통신 반경과 같다. 지상 사용자들 중 5명은 100 Mbps의 고정 데이터율을 가지며, 15명은 10 Mbps, 20명은 1 Mbps의 고정 데이터율을 가진다.

그림 2와 같이 UAV의 출력 전력은 UAV의 고도가 높아질수록, 통신 반경이 넓어질수록 높아진다. 그러나 반경 1 km를 제외한 나머지 그래프에서는 출력 전력의 증가율이 낮은 것을 볼 수 있는데, 이는 II장에서 소개한 UAV-지상 신호 감쇄 모델에 의해 발생하는 결과이다. 즉 반경이 좁을수록 LoS 신호 존재 확률이 높아 고도에 큰 영향을 받게 되지만, 반경이 넓어질수록 NLoS 신호 존재 확률이 높아 상대적으로 고도에 큰 영향을 받지 않는다.

##### 3.1.2 다중 UAV 전력 소모 최적화 모델링

다중 UAV의 전력 소모를 최소화하는 위치 선정을 위한 최적화 모델링은, 가. 항에서 확인한 출력 전력 결과를 바탕으로 다중 UAV가 존재하는 시스템에 적용·확장한다. 먼저 한 클러스터 내 UAV의 출력 전력 결과와 여러 번의 시뮬레이션을 바탕으로 시스템 내 UAV들의 고도는 서로 동일하다고 가정하며, 그 값은 고도 범위 중 가장 낮은 값  $h$ 로 설정한다. 최적화 모델링은 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \{X^*, Y^*\} &= \min_{u \in U} \sum P_{t,u} \\ \text{s.t. } x_u &\in X^*, y_u \in Y^*, u = 1, \dots, U \\ h_u &= h, \\ \sum_{u=1}^U \sum_{n \in CT_u} un &= N, \\ \sum_{n \in CT_u} C_n &< C_u. \end{aligned} \quad (7)$$

$X^*$ 와  $Y^*$ 는 다중 UAV의  $x$  좌표와  $y$  좌표의 집합이며, 제약 조건들은 II장의 시스템의 특성을 반영한 것이다.

다중 UAV의 위치 선정은 지상 사용자들의 분포, UAV의 운용 형태 등 여러 가지 변수들을 모두 고려해야 함으로 NP-난해 문제이다. NP-난해 문제를 해결하기 위한 알고리즘은 여러 종류가 있지만, (7)을 해결하기 위해서는 지상 사용자들의 클러스터링이 가능한 알고리즘이 필요하다<sup>[11]</sup>.

### 3.2 비계층 클러스터 분석

비계층 클러스터 분석은 관측하고자 하는 값들을 몇 개의 클러스터로 나누기 위해 주어진 기준을 최적화 하는 방법이다. 기본적인 분석 절차는 클러스터의 개수를 지정한 다음, 관측 값들 간의 유사도를 바탕으로 클러스터링을 수행한 뒤, 클러스터 중심을 조정하는 과정 순으로 진행된다. 클러스터링과 클러스터 중심 재조정은 반복 과정이며, 중심점이 더 이상 변화하지 않으면 반복을 종료한다<sup>[12]</sup>.

전력 소모가 최소화 되는 다중 UAV의 위치 선정을 위해, 클러스터의 개수를 지정은 UAV의 수용 능력  $C_u$ 와 전체 사용자들의 요구 데이터율을 나누어 도출한다<sup>[13]</sup>.

$$U = \left\lceil \frac{\sum_{n=1}^N C_{g,n}}{C_u} \right\rceil \quad (8)$$

클러스터의 개수가 특정된 후에는, 다중 UAV를 해당 시스템에 배치하는 초기화 과정을 수행한다. 비계층 클러스터 분석은 클러스터 중심점의 초기 값에 따라 결과 값이 달라지기 때문에, 휴리스틱 알고리즘을 활용하는 방안이 일반적이다. 본 논문에서는 데이터율이 가장 높은 사용자들 중  $U$  명을 랜덤하게 선택하여 그들의 좌표를 UAV들의 좌표로 선정, 초기화를 수행한다. 이 때 UAV  $u$ 의  $x_u$  좌표와  $y_u$  좌표는 클러스터  $CT_u$ 의 중심점이 된다.

다중 UAV들의 좌표 초기화가 완료된 후에는 모든 지상 사용자들과의 전력을 계산하여 행렬  $P$ 를 구한다. 행렬  $P$ 의 행은 지상 사용자  $n$ 의 관점에서 모든 UAV들의 출력 전력에 대한 집합이며, 열은 UAV  $u$ 로부터 모든 지상 사용자들에 대한 출력 전력의 집합이다. 행렬  $P$ 가 생성된 후에는 각 행 마다의 최소값을 찾아 그 값의 열을 행렬  $L$ 에 기록한 뒤, 클러스터

링을 수행한다.

클러스터링이 완료 된 후, 모든 UAV들에 대하여 수용 부하를 계산하여 행렬  $C$ 에 기록한다. 이 때 행렬  $C$ 의 크기는 UAV의 대수와 동일해야 한다. 만약 행렬  $C$  요소 중 가장 큰 값이 UAV의 최대 부하를 초과하게 된다면, 행렬  $P$ 와  $C$ 를 영행렬로 설정하고 그렇지 않다면, 그 값을 따로 기록한다.

이 후, 클러스터 내 모든 지상 사용자들의 좌표 평

알고리즘 1. 비계층 클러스터 방법 - 반복 부분  
Algorithm 1. Non-hierarchical method - iteration phase

```

1:  # Phase 1: Clustering
2:    for  $n = 1 : N$  do
3:      for  $u = 1 : U$  do
4:         $P[n][u] = p_{t,u}$ 
5:      end for
6:       $L[n] = \operatorname{argmin} P[n][u]$ 
7:    end for

8:  # Phase 2: Check UAV capacity
9:    for  $u = 1 : U$  do
10:     for  $n = 1 : N$  do
11:        $C[u] += C_n$ 
12:     end for
13:     if  $\operatorname{argmax} C[u] > C_u$  then
14:        $P = 0, C = 0,$ 
15:     end if
16:   end for

17: # Phase 3: Renew the centers of clusters
18: for  $u = 1 : U$  do
19:   for  $n = 1 : N$  do
20:     if  $L[n] == u$  then
21:        $x_l += x_n, y_l += y_n$ 
22:     end if
23:   end for
24:    $x_u = \operatorname{mean}(x_l), y_u = \operatorname{mean}(y_l)$ 
25: end for
26:  $L = 0$ 

27: # Phase 4: Stopping Rule
28: if  $\Delta x_u, \Delta y_u \leq \varepsilon$ 
29:   break;
30: else
31:   continue;
32: end if

```

균값을 계산하여, 새로운 UAV의 위치를 선정한다. 위의 과정을 통해 UAV들의 좌표가 갱신되고, 반복을 통해 목적하는 좌표를 찾게 된다. 반복 과정 중 더 이상 좌표의 변화가 없다면 반복을 종료한다.

알고리즘 1은 비계층 클러스터 분석 중 반복 부분에 대한 과정을 나타낸 것이다.

#### IV. 성능 평가

전력 소모가 최소화 되는 UAV들의 위치를 도출하기 위해 성능 평가를 실시하였다. 시스템의 규모는 10 km X 10 km 으로 설정하였으며, 시스템 내 지상 유

저들은 고정 데이터율 100 Mbps, 10 Mbps, 1 Mbps 을 가지는 집단이 각각 50명, 350명, 600명으로 총 1000명이 랜덤하게 분포한다. 성능분석에 활용한 나머지 파라미터는 표 1과 같다<sup>7-9)</sup>.

그림 3은 비계층 클러스터 분석의 반복 과정을 통해 획득한 UAV들의 총 소모 전력과 각 UAV들의 부하 공평도 변화도를 나타낸 것이다. UAV들의 총 소모 전력은 반복을 수행하면서 얻어지는 총 소모 전력 중 가장 큰 값을 각 반복 시기에 도출된 총 소모 전력에 나누어 정규화 하였으며, 부하 공평도는 식 9와 같이 Jain's 공평도 식을 활용하여 계산하였다.

$$J(C_u) = \frac{\left(\sum_{u=1}^U C_u\right)^2}{U \sum_{u=1}^U C_u^2} \quad (9)$$

표 1. 성능분석 파라미터  
Table 1. Performance analysis environment

Index	Value
$a, b$	(9.61, 0.16)
$c$	$3 \times 10^8$ m/s
$\eta_{LoS}, \eta_{NLoS}$	(1 dB, 20 dB)
$f$	2 GHz
$B$	1 MHz
$N_g$	-120 dBm
$C_u$	2 Gbps
$h_u$	1 km
iteration	100

반복 과정을 거치면서 UAV들의 총 전력은 감소하고, 부하 공평도는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 UAV들에게 걸리는 부하들이 점점 균등하게 분배 되면서, UAV들의 전력 소모가 감소하기 때문이다. 하지만 10번째 반복 이후 결과에서 확인할 수 있듯이, UAV의 전력이 가장 낮다고 해서 부하 공평도가 가장 높은 것은 아니다. 이는 클러스터 경계에 위치한 지상 유저들의 신호 간섭으로 인해 발생하는 현상이다. 또한 비계층 클러스터 분석의 근사해 수렴으로 인해 9번째 반복 이후부터는 총 소모 전력과 부하 공평도의 변화량이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

비계층 클러스터 분석을 통해 도출된 UAV들의 위치와 클러스터링 결과를 그림 4에 나타내었다.

표 2는 본 논문에서 활용한 비계층 클러스터 분석

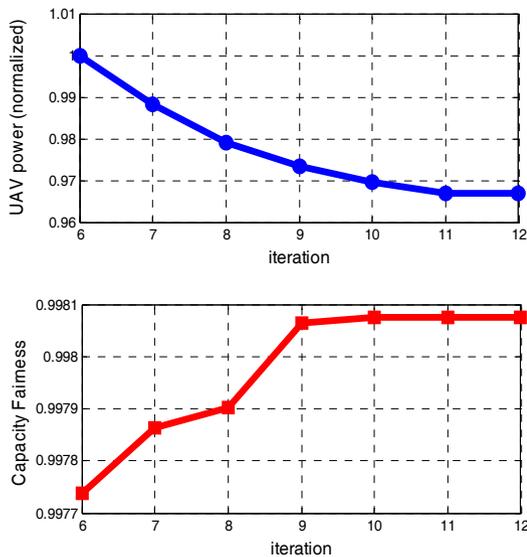


그림 3. UAV 총 전력과 부하 공평도 결과  
Fig. 3. Result of UAV power and capacity fairness

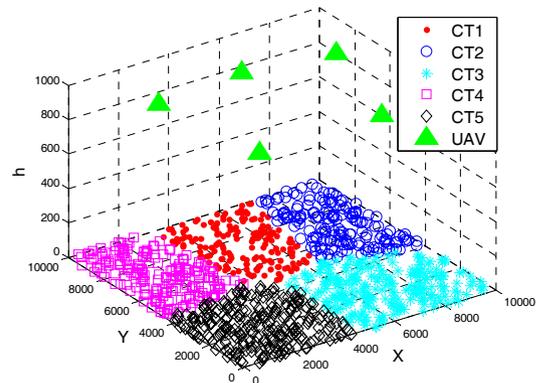


그림 4. UAV 위치 선정 결과, 3차원 그래프  
Fig. 4. Result of UAVs position, 3D view

표 2. 알고리즘 성능 비교  
Table 2. Comparison for performances of algorithms

		Non-hierarchical ( $x_u(m), y_u(m)$ )	PSO ( $x_u(m), y_u(m)$ )
UAV number	1	(5,183, 7,567)	(4,757, 5,012)
	2	(8,525, 6,933)	(7,624, 7,702)
	3	(7,111, 2,312)	(7,728, 2,289)
	4	(1,604, 7,182)	(2,068, 7,858)
	5	(2,214, 2,313)	(2,340, 2,092)
Total Power(dB)		441.12	441.56

의 성능평가를 위해, [7]에서 활용한 Particle Swarm Optimization (PSO) 알고리즘과 비교한 결과이다. PSO 알고리즘은 Particle이라는 해집단들의 이동을 통해, 최적 근사해를 찾는 메타휴리스틱 알고리즘으로, 클러스터 선정 문제와 같은 NP-난해 문제에 많이 활용되고 있다.

표 2의 결과를 통해 비계층 클러스터 분석 방법이 PSO 알고리즘에 비해 더 좋은 최적 근사해를 도출하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PSO 알고리즘의 Particle 이동 속도로 인해, 비계층 클러스터 분석 방법으로 도출된 UAV들의 위치보다 전력 소모가 더 높은 곳으로 수렴하였기 때문이다. 또한 PSO 알고리즘의 Particle이 최소 30개 이상 존재하여 컴퓨팅 파워가 높을 뿐만 아니라 연산 속도에서도 차이가 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 다양한 데이터를 가진 지상 유저들과 이들의 통신을 지원하는 다중 UAV들이 존재하는 환경을 고려하여, 전력 소모를 최소화하는 다중 UAV들에 대한 위치 근사 최적해를 도출하였다. 먼저 UAV-지상 신호 감쇄 모델을 통해 UAV와 지상 유저들의 전력 관계를 도출하였으며, 전력 소모를 최소화하는 다중 UAV들의 위치 선정을 위한 최적화 모델링을 수행하였다. 이후에는 비계층 클러스터 분석을 활용하여 최적화 문제를 수행하였으며, 그 결과 전력 소모가 최소화 되는 위치와 함께 UAV들이 지원하는 지상 유저들의 클러스터링 결과를 확인할 수 있었고 PSO 알고리즘과의 성능 비교를 통해 비계층 클러스터 분석 방법이 더 좋은 결과를 도출할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 UAV의 이동성과 지상 유저들의 이동성을 고려하지 않았기 때문에, 이러한 사항들을 바탕으로 추가적인 연구를 수행할 계획이며,

최종적으로는 UAV의 Medium Access Control (MAC) 프로토콜 개발을 수행할 예정이다.

### References

- [1] J. W. Cho, H. R. Cheon, W. Lee, J. C. Ahn, S. Jin, and J. H. kim, "MAC protocol technology trends for uav networks," *J. KICS*, vol. 42, no. 6, pp. 1216-1224, Jun. 2017.
- [2] PwC, *Infographic: Drones as a data service*(2017), Retrived May 17, 2018. from <https://www.digitalpulse.pwc.com.au/pwc-info-graphic-drones-as-data-service/>
- [3] AT&T, *When COWs Fly: AT&T sending LTE Signals from drone*(2017), Retrived May 17, 2018. from [http://about.att.com/-innovation-blog/cows\\_fly](http://about.att.com/-innovation-blog/cows_fly)
- [4] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Commun. Surv.*, vol. 18, no. 2 pp. 1-32, Nov. 2015.
- [5] J. W. Cho, J. H. kim, and S. B. Um, "Optimal low altitude UAV deployment in urban environment using particle swarm optimization," in *Proc. KICS Winter 2018*. pp. 505-506, High1 Resort, Korea, Jan. 2018.
- [6] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient internet of things communications," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 11, pp. 7574-7589, Nov. 2017.
- [7] D. T. Ho, E. I. Grotli, P. B. Sujit, T. A.

Johansen, and J. B. Soursa, "Cluster-based communication topology selection and UAV path planning in wireless sensor network," in *Proc. ICUAS 2013*, pp. 59-68, Georgia, USA, May 2013.

- [8] A. A. Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardener, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569-572, Dec. 2014.
- [9] A. A. Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," in *Proc. Globecom 2014*, pp. 2898-2904, Austin, TX, USA, Dec. 2014.
- [10] H. Shakhathreh, A. Khreishah, A. Alsarhan, I. Khalil, A. Sawalmeh, and N. S. Othman, "Efficient 3D placement of a uav using particle swarm optimization," in *Proc. ICICS 2017*, pp. 258-263, Irbid, Jordan, Apr. 2017.
- [11] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Wireless communication using unmanned aerial vehicles (UAVs): optimal transport theory for hover time optimization," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 12, pp. 8052-8066, Dec. 2017.
- [12] I. Davidson, "The complexity of non-hierarchical clustering with instance and cluster level constraints," *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 14, no. 1, pp. 25-61, Feb. 2007.
- [13] Q. Liu, Z. Zhang, H. Hu, and J. Shi, "Modeling and analysis of one-tier ultradense multiuser networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13972-13979, Mar. 2018.

조 준 우 (Jun-Woo Cho)



2015년: 아주대학교 전자공학부 졸업  
 2015년~현재: 아주대학교 전자공학과 석박사통합과정  
 <관심분야> UAV, 위성통신, 전술 데이터 링크, 국방 전술네트워크 등

김 재 현 (Jae-Hyum Kim)



1987년~1996년: 한양대학교 전산과 학사 및 석/박사 졸업  
 1997년~1998년: 미국 UCLA 전기전자과 박사 후 연수  
 1998년~2003년: Bell Labs, NJ, USA, 연구원  
 2003년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수

<관심분야> QoE/QoS, 무선 MAC 프로토콜, IEEE 802.11/15, B5G 통신 시스템, 국방 전술네트워크, 위성시스템 등