

# 무인비행체 네트워크에서 토폴로지 운용 기술 연구 동향

김도엽\*, 이장원<sup>o</sup>

## Survey on Topology Management Techniques in Unmanned Aerial Vehicle Networks

Do-Yup Kim\*, Jang-Won Lee<sup>o</sup>

### 요 약

무인비행체 시스템은 다양한 분야에서 무궁무진한 활용 가능성을 가지고 있다. 특히, 다수의 무인비행체를 이용한 애드 hoc 네트워크 시스템은 통신 기반시설에 대한 제약이 없고, 확장성이 뛰어나며, 또한 다양한 성능 이득도 얻을 수 있다. 하지만 무인비행체의 이동성에 따른 네트워크 토폴로지의 변화 때문에 시스템 안정성에 대한 고려가 필요하다. 또한 네트워크 성능 이득은 네트워크 토폴로지에 따라 매우 다를 것이며, 특히 무인비행체를 어디에 배치하고 어떻게 이동시킬 것인지를 결정하는 무인비행체 네트워크의 토폴로지 운용 기술에 대한 연구가 무인비행체 네트워크 시스템에서 매우 중요하다. 본 논문에서는 단일 무인비행체를 운용하는 시스템과 각 시스템의 목적에 따라 다수의 무인비행체가 운용되는 시스템에서의 토폴로지 운용에 관한 선행 연구들을 분석하고, 무인비행체 네트워크 토폴로지 운용 기법의 미래 연구 방향을 제시한다.

**Key Words** : Unmanned aerial vehicle (UAV), UAV network, topology management

### ABSTRACT

An unmanned aerial vehicle (UAV) system has enormous potential in various fields. In particular, an ad hoc network that consists of multiple UAVs have many advantages, such as infrastructure-less, high scalability, and various performance gains. However, the stability of the system should be considered because the network topology changes due to the mobility of the UAVs. In addition, the performance gains are highly dependent on the network topology. In particular, researches on topology management techniques, where to deploy and how to control the multiple UAVs, are necessary in the UAV network system. In this paper, we first review the previous researches on the topology management techniques in various network systems using the UAVs, in which a single UAV is operated or multiple UAVs are operated according to the purpose of each system, and then provide future research directions for the topology management techniques in the UAV networks.

※ 이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2017M1B3A1 A02937507)

• First Author : (ORCID:0000-0002-4165-1323)Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, danny.doyup.kim@yonsei.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0000-5627-5914)Yonsei University, Department of Electrical and Electronic Engineering, jangwon@yonsei.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-09-255, Received September 20, 2017; Revised January 5, 2018; Accepted January 10, 2018

## 1. 서 론

무인비행체는 조종사의 탑승 없이, 지상 관제탑으로부터 허달 받은 명령 혹은 무인 자율 비행 알고리즘에 따라 자율적으로 비행할 수 있는 비행체를 말한다. 특히, 무선 통신 모듈을 탑재하고 있는 고성능의 대형 무인비행체를 운용하는 시스템은 이미 많은 연구가 이루어진 상태이다. 예를 들어, 전쟁 지역에서 전파 방해에 의해 GPS와 같은 위치 확인 시스템을 사용할 수 없는 상황에서 위치 파악<sup>[1]</sup>, 토공 사업을 위한 사전 토지 검사<sup>[2]</sup>, 농경지 및 방목지 조사<sup>[3,4]</sup>, 자연재해 대처<sup>[5]</sup>, 도심 지역에서의 자율 감시<sup>[6]</sup>, 드론에 LTE 시스템을 접목하여 재난구조<sup>[7]</sup>와 같이 군사사업뿐만 아니라 민간사업 등의 다양한 분야에서 연구가 이루어졌으며, 많은 국가에서 이를 활용한 사업들이 활발히 진행되고 있다.

하지만 고성능의 대형 무인비행체는 일반적으로 제작 및 운용 비용이 높기 때문에 단일 혹은 소수로 구성된 시스템을 구축하여 운용하는 경우가 대부분이다. 그러나 이러한 시스템은 장거리 통신을 필요로 하고, 이는 패킷의 손실률을 급격하게 증가시킬 뿐 아니라 패킷 손실률의 하한 보장을 위해 매우 높은 통신 에너지를 요구하게 된다<sup>[8]</sup>. 또한 무인비행체의 높은 이동성에 의한 일시적인 통신 링크 두절이 전체 시스템을 마비시키는 매우 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 위와 같은 한계를 해결하기 위해서는 시스템 안정성과 네트워크 성능을 향상할 수 있는 다수의 무인비행체를 동시에 운용하는 네트워크 시스템<sup>[9]</sup>에 대한 연구가 필요하다. 특히, 배터리 기술과 임베디드 기술의 발전으로 인해 저비용으로 소형 무인비행체의 제작이 가능해졌으며, 이로 인해 다수의 무인비행체를 운용하는 네트워크 시스템의 실용성이 최근 긍정적으로 평가받고 있다. 표 1에서는 단일 무인비행체를 운용하는 시스템과 다수의 무인비행체를 동시에 운용하는 네트워

크 시스템의 특성을 보여준다.

이러한 특성에 따라 최근 다수의 무인비행체들로 형성된 애드 혹 네트워크(FANET: flying ad hoc network)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어, 무인비행체의 이동성 제어를 통한 네트워크 토폴로지 제어 기법<sup>[10]</sup>, FANET의 시스템 구조 및 open system interconnection reference (OSI) 모델 계층별 다양한 프로토콜<sup>[11]</sup>, 무인비행체의 특성을 고려한 통신 및 라우팅 프로토콜<sup>[12-16]</sup>, 그리고 무인비행체 간의 클러스터링 기법<sup>[17]</sup> 등에 관한 연구가 진행되었다.

앞에서 언급한 바와 같이, 다수의 무인비행체를 활용할 경우 여러 장점을 얻을 수 있지만, 단일 무인비행체로 구성된 시스템에서는 고려할 필요가 없었던 새로운 문제들을 고려해야 한다. 우선 무인비행체의 고속 이동성은 통신 채널 상태를 매우 다양하게 변화시킬 수 있기 때문에 네트워크 통신 신뢰도의 저하를 야기한다. 또한 무인비행체 간의 거리가 실시간으로 변화함에 따라 새로운 링크가 생성될 수 있고, 기존의 링크가 소멸되는 경우도 발생할 수 있다. 이렇게 네트워크 토폴로지의 실시간적인 변화를 고려해야 한다. 경우에 따라서는 온보드 에너지로 동작하는 무인비행체의 에너지 절약을 위해, 링크를 연속적으로 형성하지 않고 통신이 필요한 경우에만 링크를 형성하는 지연 허용 네트워킹(DTN: Delay Tolerant Networking)<sup>[18,19]</sup>과 같은 에너지 절약 기법이 필요하다. 하지만 이 기법 또한 빈번한 통신 링크의 생성과 소멸을 야기하기 때문에, 토폴로지의 변화를 고려해서 DTN 기술을 개발해야 한다. 이 외에도, 고성능의 대형 무인비행체와는 달리 저비용의 소형 무인비행체는 외부 환경의 영향을 많이 받기 때문에, 다수의 소형 무인비행체를 운용하는 시스템에서는 무인비행체의 오작동에 대응할 수 있도록 네트워크 토폴로지 복원 기법을 필요로 한다.

무인비행체 네트워크 토폴로지는 무인비행체의 위치에 따라 다르게 구성되며 무인비행체의 이동에 따라 실시간으로 변화한다. 이러한 무인비행체 네트워크의 특징 때문에 무인비행체는 안정적인 네트워크 토폴로지를 유지할 수 있도록 운용되어야 한다. 현재 다양한 목적과 제약 조건을 갖는 시스템에서 네트워크 토폴로지를 운용하는 연구가 활발히 진행되고 있지만, 무인비행체 네트워크의 라우팅 프로토콜 혹은 맥 프로토콜과 같은 연구 분야에 비해 연구 동향을 정리한 논문이 매우 부족한 것이 현실이다. 따라서 본 논문에서는 무인비행체들의 위치 및 이동성을 제어함으로써 네트워크 토폴로지를 운용하는 다양한 연구에 대해서

표 1. 단일 및 다수 무인비행체 시스템 특성  
Table 1. Features of single and multi-UAV system

Feature	Single UAV system	Multi-UAV system
Required UAV performance	High	Low
UAV cost	High	Low
System stability	Low	High
System scalability	Low	High
System complexity	Low	High

소개하고 분석하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 무인비행체 네트워크 시스템을 분류하고, 3장에서는 분류한 시스템에 따라 무인비행체 네트워크 토폴로지를 운용하는 다양한 연구들을 분석한다. 4장에서는 무인비행체 네트워크 토폴로지 운용 기법에 대한 미래 연구 방향을 제시하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 무인비행체 네트워크 시스템의 분류

기존 네트워크 시스템에서 토폴로지 운용 기법은 주로 고정된 두 노드 간 링크를 형성할 것인지 아닌지를 결정하여 전송률을 향상하는 것에 초점을 두었다. 그러나 무인비행체 네트워크 시스템에서는 무인비행체의 이동성에 의해 두 노드 간 링크의 생성과 소멸이 빈번하게 발생하여 네트워크 토폴로지가 시시각각 변화하기 때문에, 단순히 전송률을 향상하는 연구뿐만 아니라 네트워크 안정성 등을 고려한 토폴로지 운용에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 기존에 여러 논문에서 제안되었던 무인비행체 네트워크의 토폴로지 운용 기법들은 각각 특정한 시스템 환경에서 최적화된 방법을 제안하고 있다. 우리는 무인비행체 시스템 특징에 따라 크게 단일 무인비행체 시스템과 다수의 무인비행체 시스템으로 구분하고, 다수의 무인비행체 시스템을 시스템 목적에 따라 다섯 가지 유형으로 세분화하여 각 유형에 따른 토폴로지 운용 연구 동향에 대하여 살펴볼 것이다.

**단일 무인비행체 시스템**은 단일의 무인비행체를 운용하는 시스템으로 무인비행체의 특성에 매우 영향을 많이 받는 시스템이다. 일반적으로 무인비행체는 크게 날개의 종류에 따라 고정익 무인비행체와 회전익 무인비행체로 나뉜다. 회전익 무인비행체는 회전하는 날개를 이용하여 수직 이착륙이 가능하며 제자리 비행 등의 다양한 운동 방향을 가질 수 있다. 반면에 고정익 무인비행체는 속도를 얻게 되면 고정된 날개로부터 양력이 발생하여 비행하는 원리를 갖기 때문에 전향으로만 비행이 가능하며 수직 이착륙 및 제자리 비행이 불가능하지만 에너지 효율 및 속도 측면에서 유리한 특성이 있다. 단일의 고정익 무인비행체의 이동성을 제어하여 효율적인 토폴로지를 구성하는 연구가 진행되었다<sup>20-22</sup>.

**연결성 향상을 위한 무인비행체 네트워크 시스템**은 무인비행체를 추가로 배치하고 운용함으로써 지상에 이미 존재하는 mobile ad hoc network (MANET)의 연결성을 높이는 것을 목표로 한다. 여기에서

MANET은 이동성을 갖는 노드들이 기지국과 같은 기반 시설 없이 애드 혹 네트워킹을 통해 데이터를 송수신하는 무선 네트워크로, 노드들의 이동성 때문에 네트워크의 토폴로지가 실시간으로 변화한다. 특히 두 노드가 서로 멀어지는 이동을 할 경우 기존의 통신 링크가 소멸될 수 있고 심지어 네트워크가 두 개의 부분 네트워크로 분리될 수도 있다. 따라서 무인비행체 운용을 통해 MANET 실시간적인 토폴로지 변화에 강한 네트워크를 만드는 연구가 진행되었다<sup>23-25</sup>.

**무인비행체-기지국 네트워크 시스템**은 무인비행체를 기지국과 같이 운용하는 시스템으로 차세대 이동 통신망에서 매우 필요한 기술이다. 현재 차세대 이동 통신망은 높은 신뢰도와 전송률뿐만 아니라, 기존 이동 통신망에 비해 1000배 이상의 단말 수를 커버할 수 있는 시스템을 요구한다. 그러나 특정 지역에 유저가 밀집되어 통신 지원을 요하는 단말의 수가 갑자기 많아지거나 채널 상황이 안 좋아지는 경우, quality of service (QoS)를 만족시키지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 상황에 무인비행체를 파견하여 기지국으로 운용하여 QoS를 만족시켜 줄 수 있다. 특히, 무인비행체를 어느 위치로 파견해서 운용해야 할 것인지에 대한 연구가 진행되었다<sup>26-28</sup>.

**네트워크 복구를 위한 무인비행체 네트워크 시스템**은 기존 네트워크에 문제가 발생하는 경우 무인비행체를 급파하여 문제를 신속히 해결하는 시스템을 말한다. 기존 애드 혹 네트워크에서는 노드에 문제가 생겨 네트워크가 분리되거나 원활한 통신이 되지 않는 경우, 해당 노드를 찾아서 수리함으로써 네트워크를 복구하였다. 그러나 이와 같은 방식은 수리하는 동안 네트워크의 통신이 단절되는 문제가 발생할 수 있다. 특히 지연에 민감한 데이터 전송을 요하는 시스템의 경우 빠른 조치가 필요하기 때문에, 무인비행체를 급히 파견하여 네트워크의 단절을 막고 문제를 해결하는 연구가 진행되었다<sup>29-31</sup>.

**무인비행체 중계 체인 시스템**은 소스 노드와 목적지 노드 사이의 거리가 멀거나 혹은 가까울지라도 통신을 방해하는 장애물이 있어 직접 통신이 되지 않는 경우에 사용될 수 있다. 무인비행체들로 소스 노드와 목적지 노드 사이에 체인과 같은 토폴로지를 구성하고, 중계기 역할로 운용하여 소스 노드와 목적지 노드 간 통신을 가능하게 만들어주는 시스템을 말한다. 해당 시스템의 네트워크 토폴로지는 체인 형태를 갖기 때문에, 각 노드는 자신에게 데이터를 전송하는 선행 노드와 자신이 데이터를 보낼 자식 노드와의 상관관계를 이용하는 연구가 진행되었다<sup>32,33</sup>.

**무인비행체 백본 네트워크 시스템**은 다수의 무인 비행체들을 통해 백본 네트워크를 구축하는 시스템을 말한다. 주어진 네트워크 토폴로지가 있는 환경에서 소수의 무인비행체를 추가 배치하거나 배치되어 있는 무인비행체의 이동성을 제어함으로써 토폴로지에 변화를 주어 특정 성능을 높이는 시스템과는 달리, 주어진 네트워크 토폴로지가 없는 상태에서 백본 네트워크를 구축해야하기 때문에 시나리오와 향상하고자 하는 성능 파라미터에 매우 민감하다. 특히 고립된 노드들이 산재되어 있고 주어진 네트워크 토폴로지가 없는 상태에서, 다수의 무인비행체들로 백본 네트워크 토폴로지를 구성하는 연구가 진행되었다<sup>34-38)</sup>.

### III. 무인비행체 네트워크 토폴로지 운용 연구 동향

본 장에서는 2장에서 분류한 무인비행체 시스템과에 따라 네트워크 토폴로지 운용에 대한 기존 연구들을 분석한다.

#### 3.1 단일 무인비행체 시스템

[20]에서는 고정익 무인비행체가 클러스터링 되어 있는 무선 센서 네트워크(WSN: wireless sensor network)에서 waypoints를 따라 비행하면서 센서들로부터 데이터를 수집하고, 센서들은 데이터를 무인비행체로 직접 전송하는 방식과 클러스터 헤드(cluster head)를 거쳐서 전송하는 방식 중 에너지 소모가 적은 방식을 택해서 데이터를 전송하는 시스템을 고려하였다. 이와 같은 시스템에서 Particle Swarm Optimization (PSO) 알고리즘을 통해 에너지 소모량, 비트 에러율, 그리고 비행시간의 가중 합을 최소화하는 waypoints를 지나가는 궤도 비행경로(Dubins path)를 찾는 연구를 하였다. 이 논문에서는 각 센서 노드들이 자율적으로 에너지 소모가 적은 전송 방법을 택할 수 있다고 가정하였기 때문에 연산 장치를 갖고 있는 센서 노드들을 사용하는 시스템에서만 적용될 수 있다.

[21]에서는 통신 두절 상태에 있는 소스 노드와 목적지 노드 사이에서 원형 궤도를 따라 비행하는 고정익 무인비행체를 배치함으로써 소스 노드와 무인비행체, 무인비행체와 목적지 노드 간 링크를 구성해서 통신이 가능하도록 만드는 시스템을 고려하였다. 여기에서 최소 outage capacity를 보장하면서, 네트워크 capacity와 송수신 및 비행에 의한 소비 전력의 비로 정의된 에너지 효율성을 최대화하는 궤도의 반지름을 찾는 연구를 하였다.

[22]에서는 [21]과 같은 상황에서 무인비행체가 일정 시간  $t$ 초 동안 소스 노드로부터 데이터를 수신하여 복호하고,  $T-t$ 초 동안 목적지 노드로 데이터를 전달하는 복호 후 전달(DF: decode-and-forward) 중계 기법을 사용하는 시스템을 고려하였다. 이와 같은 시스템에서 데이터 전송률을 최대화하는 시간 분배를 찾고, outage가 발생할 확률을 수학적으로 분석하였다. 논문 [21]과 [22]에서 제안된 기법을 모두 이용하여 에너지 효율성을 최대화하는 원형 비행경로를 구하고, 구해진 비행경로로 무인비행체가 비행을 할 때 데이터 전송률을 최대화하는 시간 분배를 찾는 하나의 통합 기법으로 발전 가능성이 있다. 또한 다수의 고정익 무인비행체를 이용한 시스템에 관해서는 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

#### 3.2 연결성 향상을 위한 무인비행체 네트워크 시스템

[23]에서는 MANET을 가중 그래프로 모델링하여 4가지 connectivity metric을 정의하였다. 임의의 두 노드 사이에 Rayleigh 무선 통신 채널을 고려했을 때 통신 성공률이 특정 값 이상이면 두 노드 사이의 링크가 존재하고, 각 링크 cost는 통신 성공률에 의해 주어진다 가정하였다. 4가지 connectivity metric은 모든 링크들의 통신 성공률을 함께 고려하는 global message connectivity (GMC), 통신 성공률이 가장 낮은 링크만 고려하는 worst-case connectivity (WCC), 그래프가 임의의 두 네트워크로 분리될 확률을 고려하는 network bisection connectivity (NBC), 임의의  $k-1$ 개의 노드가 제거되어도 네트워크가 분리되지 않을 상한선을 고려하는  $k$ -connectivity (KC)이다. 이 논문에서는 gradient 알고리즘을 이용하여 높은 연결성을 얻는 단일 무인비행체의 최적의 위치를 찾은 후, 무인비행체의 이웃 노드들의 이동성 정보를 바탕으로 무인비행체의 최적의 이동성을 찾아 토폴로지를 운용하는 연구를 하였다.

[24]에서는 다수의 이동성을 갖는 선박들로 구성된 애드 혹 네트워크에 무인비행체를 운용함으로써 [23]에서 제시된 GMC metric을 최적화하는 연구를 하였다. 또한 무인비행체의 동역학적인 제약조건을 고려하여 매 타임 슬롯에서 최적의 위치를 구하는 연구를 하였다. 단일 무인비행체를 통해 토폴로지를 운용한 시뮬레이션 결과만 보여준 [23]과는 달리, 다수의 무인비행체를 운용한 시뮬레이션 결과를 제시하여 성능을 보였으나, 특정 알고리즘을 이용하여 최적의 위치를 찾지 않고 Matlab 프로그램을 이용하여 수치적으로

최적의 위치를 구하기 때문에 고려하는 공간이 클수록 혹은 고려하는 무인비행체 수가 많아질수록 복잡도가 기하급수적으로 증가해서 최적의 위치를 구하기 어렵게 된다.

[25]에서는 빌딩과 같은 장애물에 의해 line of sight (LoS) 통신 확률이 낮은 도심지 환경에서 무인비행체들의 배치와 운용에 대한 연구를 하였다. 통신 성공률만을 고려하여 가중 그래프를 모델링한 [23]과는 달리, 통신 성공률뿐만 아니라 LoS 통신이 안 되는 경우와 무인비행체의 고도에 따른 벌이익(penalty)을 동시에 고려하여 가중 그래프를 모델링하였다. 또한 modified global message connectivity (mGMC)라는 통신 성공률이 일정 수준 미만인 링크들만을 고려한 새로운 connectivity metric을 정의하고, PSO 알고리즘을 통해 mGMC 값을 최소화하는 무인비행체들의 위치를 찾는 연구를 하였다. 이 논문에서 정의한 mGMC는 기존의 모든 링크를 고려하는 GMC metric 과 통신 성공률이 가장 낮은 링크만을 고려하는 WCC metric을 적절한 비율로 고려할 수 있기 때문에 GMC 와 WCC의 일반화된 metric이라고 볼 수 있다.

### 3.3 무인비행체-기지국 네트워크 시스템

[26]에서는 특정 구역에 유저들이 분포되어 있을 때, 기지국(BS: base station) 역할을 하는 무인비행체들을 어디에 배치해야 무인비행체와 통신 링크가 생성되는 유저의 수를 최대화할 수 있는지에 대한 연구를 하였다. 여기에서 무인비행체와 유저 사이의 무선 통신 채널을 stochastic LoS 채널로 모델링하였으며, 채널에 따른 경로 손실(path loss) 수치가 일정 수준 이하인 경우에만 링크가 생성된다고 고려하였고, bisection 알고리즘을 통해 문제를 해결하였다. 이 논문에서는 무인비행체와 유저 사이의 채널을 path loss 수치만으로 근사하였기 때문에, 채널 간섭에 의한 효과는 고려되지 않는다. 또한 유저들의 위치가 주어진 상황에서 최적의 위치를 찾는 문제를 고려하고 있기 때문에 모든 유저들의 위치 정보를 사전에 알아야 한다는 한계가 있다.

[27]에서는 다수의 부분 구역에 유저들이 확률적으로 분포되어 있는 경우에, 모든 유저들의 최소 전송률을 보장하면서 기지국 역할을 하는 무인비행체의 전송 전력을 최소화하는 위치와 통신 커버리지를 구하는 연구를 하였다. 무인비행체와 유저들 사이의 무선 통신 채널은 [26]과 동일한 모델을 사용하였으며, 무인비행체들의 위치와 통신 커버리지를 동시에 고려하여 문제를 해결하는 것이 어렵기 때문에, 무인비행체

들의 통신 커버리지가 주어져 있다는 가정 하에서 위치를 구하고, 구해진 위치를 통해 통신 커버리지를 구해서 갱신하는 과정을 반복하는 iterative 알고리즘을 통해 문제를 해결하였다. 이 논문 또한 [26]에서와 같이 채널 간섭은 고려하지 않지만 유저 분포를 확률 밀도 함수로 모델링하여 고려함으로써 유저들의 위치 정보를 이용하지 않는다. 모든 유저들의 위치와 이동성을 실시간으로 파악하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 [26]에 비해 보다 현실적이다.

[28]에서는 앞의 논문 [26] 및 [27]과는 달리 채널 간섭 효과를 고려하였다. Signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) 값이 특정 수치 이상일 확률을 통신 커버리지 확률로 정의하여, 특정 원형 구역에서 통신 커버리지를 최대화하기 위한 다수의 무인비행체들의 최적의 위치를 찾는 연구를 하였다. 이 논문에서는 circle packing 이론을 이용해서 우선 높이를 고려하지 않고 2차원 공간에서 무인비행체들의  $(x, y)$  좌표들을 구하고, 해당 2차원 좌표를 기반으로 통신 커버리지를 특정 수준 이상 보장하면서 무인비행체들의 통신 커버리지가 최대한 겹치지 않고 넓어지기 위한 높이( $h$ )의 상한선을 구하였다.

### 3.4 네트워크 복구를 위한 무인비행체 네트워크 시스템

[29]에서는 자연재해에 의해 노드들이 코어 네트워크와 통신이 단절되는 경우, 무인비행체를 적절한 위치에 파견하여 네트워크를 복구하는 연구를 하였다. 이 논문에서는 hello 메시지 교환을 통해 통신이 단절된 노드를 발견하는 연결성 모듈(connectivity module)과 코어 네트워크와 가장 가까이에서 통신이 단절된 노드를 찾고 무인비행체를 배치하여 네트워크를 복구하는 배치 모듈(deployment module)을 제시하였다. 또한, 노드 간의 거리와 패킷 전송 성공률의 비율을 링크의 cost로 정하는 Bellman-Ford 알고리즘을 사용하여 최적의 라우팅 경로를 업데이트하는 알고리즘을 제안하였다.

[30]에서는 다수의 지상 노드와 무인비행체가 공존하여 애드 혹 네트워크로 구성되어 있는 상황에서 네트워크가 분리되는 경우, 기존의 무인비행체뿐만 아니라 새로운 무인비행체를 어떻게 운용할 것인지에 관한 연구를 하였다. 이는 이동성이 없는 노드들로 구성된 네트워크가 단절되는 경우를 고려한 [29]에 비해 일반적인 상황을 고려한 것이다. 이 논문에서는 기존의 무인비행체의 이동성을 제어하면서 새로 추가될 무인비행체의 수를 최소화하고, 동시에 새로 추가되는

무인비행체들을 어디에 배치할 것인지에 관한 최적화 문제를 해결하는 heuristic 알고리즘을 제안하였다. 논문 [29]에서는 사용 가능한 무인비행체 수에 대한 제약 없이 네트워크 단절이 발생하면 무인비행체를 파견하는 반면, 이 논문에서는 무인비행체의 수를 최소화할 수 있도록 기존 무인비행체의 이동성을 제어하기 때문에 [29]에 비해 더 적은 수의 무인비행체가 운용될 수 있다.

[31]에서는 무인비행체를 일반 무인비행체 노드와 중계 무인비행체 노드로 구분하여, 일반 무인비행체의 위치 정보와 속도 정보를 이용해서 중계 무인비행체의 움직임을 운용하여 네트워크의 분리를 막는 연구를 하였다. 이 논문에서는 중계 무인비행체의 총 비행 거리를 최소화하는 실시간 속도를 찾는 Steiner point를 이용한 heuristic 알고리즘을 제안하였다. 또한 일반 무인비행체 노드의 개수가 주어질 때, 몇 개의 중계 무인비행체가 있어야 네트워크가 단절로부터 강인한지에 관한 연구를 하였지만, 중계 무인비행체의 개수에 따른 네트워크 강인함의 정도를 수치적으로 분석하였기 때문에 일반 무인비행체 노드의 이동성이 높아져 네트워크 토폴로지가 많이 변한 경우에는 해당 분석이 유효하지 않다는 한계가 있다.

### 3.5 무인비행체 중계 체인 시스템

[32]에서는 LoS를 저해하는 장애물이 존재하는 공간에서 무인비행체를 중계 체인으로써 운용하는 시스템을 고려하였다. LoS 통신을 할 수 있는 확률을 고려하여 링크의 cost를 정의하고, 문제의 복잡도를 낮추기 위하여 소스 노드와 목적지 노드 사이의 연속 공간을 이산 공간으로 근사하였다. 이 논문에서는 통신 성능을 높이기 위하여 소스 노드에서 목적지 노드까지의 링크 cost들의 합을 최소화하도록 중계 체인을 구성하는 방법과 최소 개수의 무인비행체를 사용하기 위하여 소스 노드에서 목적지 노드까지의 hop 수를 최소화하도록 중계 체인을 구성하는 방법 사이의 가능한 중계 체인을 모두 찾는 dual ascent 알고리즘과 변형된 Bellman-Ford 알고리즘을 제안하였다. 링크의 cost를 설정하는데 있어서 주어진 통신 거리 내에 LoS 존재 확률만을 고려해서 실질적 통신에 대한 성능이 고려되지 않았는데, 소스-목적지 사이의 딜레이 또는 통신 채널을 고려한 연구로 발전될 수 있다.

[33]에서는 링크의 성능으로 Shannon capacity와 IEEE 802.11b의 실측적 모델을 고려하여 최대의 chain capacity 성능을 얻도록 무인비행체를 운용하는 시스템을 연구하였다. 여기에서 chain capacity는 모

든 링크 중에서 worst 링크의 capacity와 중단 간 지연시간(end-to-end delay)으로 정의된다. 이 논문에서는 확률 근사 기법을 사용해서 chain capacity의 gradient 값을 추정하는 least squares gradient estimation (LSGE) 모듈, 추정된 gradient 값을 통해 chain capacity가 향상되도록 무인비행체의 이동성을 제어하는 virtual control point dynamics 모듈, 고정익 무인비행체의 궤도 비행 특성을 고려한 Lyapunov guidance vector field (LGVF) 제어 모듈, 그리고 gradient 값을 정교하게 교정해주는 phase 제어 모듈로 구성된 decentralized electronic chaining controller를 제안하였다. 이 논문은 실제 무인비행체를 이용하여 실험을 하고 본 chaining controller를 입증하였다. 비록 전체 무선 주파수 장에 대한 정확한 값이 없어 최적의 릴레이 체인 토폴로지를 위한 무인비행체의 위치를 계산할 수 없지만, 측정되는 신호의 세기와 chain capacity의 이득을 통해 성능을 검증하였다. 시뮬레이션만을 통해 성능을 검증한 타 연구들에 비해 실제 환경에서의 실험을 통해 성능을 검증함으로써 chaining controller 기법에 대한 높은 신뢰성을 주었다.

### 3.6 무인비행체 백본 네트워크 시스템

[34]에서는 다수의 센서들이 고립되어 있는 WSN에서 다수의 무인비행체들을 백본 네트워크로 운용하여 지상 관제탑이 모든 센서로부터 데이터를 수신할 수 있도록 하는 연구를 하였다. 각 무인비행체들은 비콘(beacon) 신호를 통해 링크의 유무를 확인하고, received signal strength indication (RSSI) 수치를 통해 링크의 통신 품질 수준을 판단하여, 각 무인비행체들이 링크들의 통신 품질 수준에 따라 비행 방향을 선정하는 분산형 알고리즘을 제안하였다. 이 논문에서 제안된 알고리즘은 고립 노드가 넓은 범위에 걸쳐 높은 밀도로 분포되어 있을 때 백본 네트워크를 효과적으로 구성해준다. 그러나 특정 모양을 갖는 범위에 걸쳐서 센서들이 분포되어 있거나 낮은 밀도로 센서들이 분포되어 있는 경우에는 좋은 백본 네트워크를 보장해주지 못하는 한계가 있다.

[35]에서는 다수의 단말들로 구성된 클러스터가 산재해 있는 상황에서, 다수의 클러스터와 통신 링크를 동시에 맺을 수 있는 무인비행체들로 백본 네트워크를 구성하는 문제를 고려하였다. 여기에서 각 단말은 동일 클러스터의 단말과 애드 혹 네트워킹을 통해 데이터 통신을 하며, 다른 클러스터에 있는 단말과는 무인비행체를 거쳐서 multi-hop 방식으로 통신을 하는

표 2. 무인비행체 네트워크 시스템에서의 토폴로지 운용에 관한 선행 연구  
 Table 2. Previous works on topology management in the UAV network systems

UAV Network System	Ref.	Given Network	Objective	Approach
Single-UAV system	[20]	clustered WSN	min weighted sum of energy consumption, bit error rate, and path travel time	PSO algorithm
	[21]	two nodes	max energy efficiency	mathematical analysis
	[22]	two nodes	max data rate	mathematical analysis
UAV network system for connectivity improvement	[23]	MANET	min GMC, WCC, NBC, KC	gradient algorithm
	[24]	MANET	min GMC	heuristic algorithm
	[25]	MANET	min mGMC	PSO algorithm
UAV-BS network system	[26]	multi-user	max number of links	bisection algorithm
	[27]	multi-user	min power and max coverage	iterative algorithm
	[28]	multi-user	max coverage	circle packing theory
UAV network system for network recovery	[29]	FANET	recover the network	modified Bellman-Ford algorithm
	[30]	MANET	min number of new UAVs	heuristic algorithm using MST
	[31]	FANET	min sum of moving distances of UAVs	heuristic algorithm using Steinerization
UAV relay-chain system	[32]	two nodes	min sum of all link distances	dual ascent algorithm and modified Bellman-Ford algorithm
	[33]	two nodes	max chain capacity	gradient-based platform
UAV backbone network system	[34]	isolated sensor nodes	cover sensor nodes	distributed heuristic algorithm
	[35]	user clusters	min weighted sum of distances between UAVs and clusters	five-rule algorithm
	[36]	-	min sum of all link distances	tabu search algorithm
	[37]	client nodes	min max link distance	SA algorithm
	[38]	mission nodes	min generalized objective function	PSO algorithm

시스템을 고려하였다. 이 논문에서는 우선 단일 무인비행체 시스템에서 각 클러스터와의 거리의 가중 합을 최소화하는 최적의 무인비행체 위치를 찾는 연구를 한 후, 5가지 무인비행체의 움직임에 대한 규칙을 정의하여 다수의 무인비행체 시스템으로 확장을 하였다. 5가지 규칙은 단말들과의 연결성을 고려한 move toward point above weighted-centroid, 백본 네트워크의 연결성을 고려한 attract to UAV, 통신 커버리지 확대와 무인비행체 간의 안전거리 확보를 고려한 repel from UAV, 고정익 무인비행체의 특성을 고려한 hoverer, 네트워크 복구를 고려한 roam 규칙이다. 또한 지상 노드와 임의의 무인비행체 간의 링크 연결이 유지되는 시간과 전체 시스템 동작 시간의 비율을 고려한 ground node to UAV (G-U) 성능 지표와 소스 노드와 목적지 노드 사이의 모든 hop들 간의 링크 연결이 유지되는 시간과 전체 시스템 동작 시간의 비

율을 고려한 ground node to ground node via UAV (G-U-G) 성능 지표를 정의하고 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다. 이 논문에서는 다수의 단말들이 클러스터링 되어 있고, 동일 그룹 내에서 단말들은 통신이 성공적으로 된다고 가정하였다. 실제로는 단말들의 클러스터링 기준과 동일 그룹 내에서 단말 간 통신 방법에 따라 최적의 무인비행체 백본 네트워크가 다를 수 있기 때문에, 이러한 가정을 구체화 하여 문제를 해결함으로써 발전 될 수 있다.

[36]에서는 무인비행체마다 수용 가능한 링크의 개수가 정해져 있는 상황에서, 지상의 노드와 무인비행체 사이의 모든 링크들의 길이의 합을 최소화하도록 무인비행체를 배치하여 백본 네트워크를 구성하는 연구를 하였다. 우선 문제를 선형 facility location problem (FLP)로 재구성한 후, tabu search 알고리즘을 이용하여 문제의 해결법을 제시하였다.

[37]에서는 클라이언트 노드들이 배치되어 있는 상황에서 다수의 무인비행체들을 적절한 위치에 배치하여 임의의 두 클라이언트 노드 사이에 경로를 갖는 토폴로지를 만드는 연구를 하였다. 이 논문에서는 클라이언트 노드들과 무인비행체들로 이루어진 Euclidean minimum spanning tree에서 가장 긴 링크의 길이를 최소화하도록 무인비행체들을 배치하는 문제를 simulated annealing (SA) 알고리즘을 이용하여 해결하였다. 또한 인접 노드들의 외심점을 이용한 토폴로지 업데이트 알고리즘을 통해, 클라이언트 노드들의 이동성에 대비하여 실시간으로 토폴로지가 운용되는 분산형 알고리즘을 제안하였다.

[38]에서는 지상 관제탑과 임무를 수행하는 무인비행체들이 있는 상황에서 다수의 무인비행체들을 적절한 위치에 배치하여 임무를 수행하는 모든 무인비행체와 지상 관제탑 사이에 애드 혹 네트워크가 가능한 백본 네트워크 토폴로지를 구성하는 연구를 하였다. 이 논문에서는 임의의 라우팅 프로토콜을 사용하는 모든 시나리오에 적용 가능한 토폴로지 생성 알고리즘을 만들기 위해서, 주어진 네트워크 토폴로지에서의 라우팅 프로토콜에 따라 임무를 수행하는 무인비행체와 지상 관제탑 사이의 라우팅 경로를 주는 라우팅 함수를 고려하였다. 또한 특정 성능을 나타내는 목적 함수가 아닌 라우팅 함수에 대한 일반화된 목적 함수를 갖는 최적화 문제를 세우고, PSO 알고리즘을 이용해서 문제를 해결하였다. 위 논문 [36-38]에서는 노드들의 이동성에 따라 분산형 방식으로 토폴로지를 운용하는 방법을 따로 제안하지 않았기 때문에, 일정 수준 이상 네트워크 토폴로지가 변할 때마다 문제를 새로 풀어서 백본 네트워크 토폴로지를 재구성해야 하는 한계가 있다. 백본 네트워크 토폴로지를 재구성하지 않고, 토폴로지를 효율적으로 조정하는 방법을 개발함으로써 발전될 수 있다.

표 2에서는 앞서 소개한 무인비행체 네트워크 토폴로지 운용 연구들의 정리를 보여준다.

#### IV. 무인비행체 네트워크 토폴로지 미래 연구 방향

**어플리케이션을 고려한 무인비행체 네트워크 토폴로지:** 무인비행체 네트워크를 필요로 하는 어플리케이션은 다양하다. 이때, 어플리케이션의 시나리오와 목표는 무인비행체 네트워크의 토폴로지를 설계하는데 지대한 영향을 미친다. 특정 무인비행체들의 제어를 요하는 어플리케이션의 경우 해당 무인비행체들의 위치 정보와 이동성 정보를 바탕으로 네트워크의 토폴로지를 설계해야 하며, 어플리케이션의 목표를 통해 미래 상황을 예측하여 네트워크의 토폴로지를 적절하게 운용하는 기법에 대한 연구도 필요할 것으로 보인다.

**QoS를 고려한 무인비행체 네트워크 토폴로지:** 통신의 QoS metric은 무인비행체 네트워크의 토폴로지를 운용하는 데 있어서 지대한 영향을 미친다. 기존에는 자유공간에서의 전파 손실 모델을 고려해서 QoS metric을 정의하여, QoS를 만족하는 토폴로지를 운용하는 연구가 많이 진행되었으나, 다양한 통신 QoS metric에 대한 연구가 필요하다. 예를 들어, 데이터 트래픽을 고려할 경우 라우팅 프로토콜에 따른 데이터 트래픽의 흐름을 파악하여 무인비행체 간의 통신이 outage가 발생하는지 고려해야 한다. 또 다른 예로, 데이터별로 중요도가 다르게 설정되어 있는 시스템에서는 QoS metric 값을 정하는데 신중해야 한다. 중요도가 높은 데이터의 전송 성공률과 중요도가 낮은 데이터의 전송 성공률에 대한 서비스 품질을 다르게 계산해야 할 것이다. 이와 같은 다양한 QoS metric에 따른 네트워크의 토폴로지 운용에 대한 연구가 필요시 된다.

**이종의 무인비행체 네트워크 토폴로지:** 기존의 많은 연구에서는 동종의 무인비행체로 이루어진 네트워크에 대한 연구가 많이 진행되었다. 그러나 실질적으로 무인비행체 별로 통신 성능 및 속도 등이 다를 수 있다. 또한 고정익 무인비행체와 회전익 무인비행체가 동시에 운용되는 시스템을 고려할 수도 있다. 이처럼 이종의 무인비행체로 이루어진 네트워크에서 토폴로지를 효율적으로 운용하는 연구가 필요시 된다.

**에너지 소모를 고려한 네트워크 토폴로지:** 무인비행체 네트워크에서는 통신을 위한 에너지 소모와 무인비행체의 비행에 따른 에너지 소모가 발생한다. 특히 토폴로지를 어떻게 설계 및 운용하는지에 따라 에너지 소모량이 매우 달라질 수 있다. 기존의 많은 연구에서는 무인비행체들은 고정된 송신 전력을 갖는 시스템을 고려하였다. 그러나 무인비행체가 송신 전력을 필요한 만큼만 취하는 시스템을 고려한다면 네트워크 토폴로지에 따라 총 송신 전력의 양은 매우 달라질 것이다. 또한 토폴로지를 운용하는 데 있어서 무인비행체의 이동에 따른 에너지 소모량을 고려한 연구가 필요시 된다.

**V. 결 론**

임베디드 기술의 발전으로 인하여 무인비행체의 활용도가 높아짐에 따라, 무인비행체 네트워크는 군사사업과 더불어 민간사업 등에서 활발히 활용되어 많은



서비스를 제공할 수 있게 될 것으로 전망된다. 따라서 무인비행체 네트워크에 관한 많은 선행 연구가 진행되었지만, 토폴로지 관점에서 무인비행체를 어떻게 운용할 것인지에 관한 연구는 아직 타 분야에 비해 많이 부족한 실정므로 더 많은 연구가 필요한 분야이다. 본 논문에서는 무인비행체 네트워크의 토폴로지 운용에 관한 연구 동향에 대하여 조사하였고, 앞으로의 연구 방향을 제시하였다.

## References

- [1] D.-H. Kim, K. Lee, M.-Y. Park, and J. Lim, "Uav-based localization scheme for battlefield environments," in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 562-567, San Diego, CA, USA, Nov. 2013.
- [2] S. Siebert and J. Teizer, "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (UAV) system," *Autom. Construct.*, vol. 41, pp. 1-14, May 2014.
- [3] H. Saari, I. Pellikka, L. Pesonen, S. Tuominen, J. Heikkilä, C. Holmlund, J. Mäkynen, K. Ojala, and T. Antila, "Unmanned aerial vehicle (UAV) operated spectral camera system for forest and agriculture applications," in *Proc. SPIE*, vol. 8174, pp. 81740H-1-81740H-15, Prague, Czech Republic, Oct. 2011.
- [4] A. Rango, A. Laliberte, and J. E. Herrick, "Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management," *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 3, no. 1, pp. 033542-1-033542-15, Aug. 2009.
- [5] Z. Xu, J. Yang, C. Peng, Y. Wu, X. Jiang, R. Li, Y. Zheng, Y. Gao, S. Liu, and B. Tian, "Development of an UAS for post-earthquake disaster surveying and its application in ms7.0 lusher earthquake, sichuan, china," *Comput. & Geosci.*, vol. 68, pp. 22-30, Jul. 2014.
- [6] E. Semsch, M. Jakob, D. Pavlicek, and M. Pechoucek, "Autonomous UAV surveillance in complex urban environments," in *Proc. IEEE/WIC/ACM WI-IAT*, pp. 82-85, Milan, Italy, Sept. 2009.
- [7] M. Do, *Disaster rescue system using drones and ultra-small LTE live encoders: Part I*(2017), Retrieved July 26, 2017, from <http://www.netmanias.com/ko/?m=view&id=blog&no=12562>.
- [8] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, New York, USA: Cambridge Univ. Press, 2005.
- [9] V. Sharma and R. Kumar, "A cooperative network framework for multi-UAV guided ground ad hoc networks," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 77, no. 3-4, pp. 629-652, Mar. 2015.
- [10] Z. Zhao and T. Braun, "Topology control and mobility strategy for UAV ad-hoc networks: A survey," in *Proc. WWIC*, pp. 27-32, Santorini, Greece, Jun. 2012.
- [11] I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel, "Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey," *Ad Hoc Netw.*, vol. 11, no. 3, pp. 1254-1270, May 2013.
- [12] J. Li, Y. Zhou, and L. Lamont, "Communication architectures and protocols for networking unmanned aerial vehicles," in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 1415-1420, Atlanta, GA, USA, Dec. 2013.
- [13] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.
- [14] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1123-1152, 2nd Quart., 2016.
- [15] Y. Park and J. Jung, "Performance analysis of position based routing protocol for UAV networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 2, pp. 185-195, Feb. 2012.
- [16] 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.
- [17] J. Wang, C. Jiang, Z. Han, Y. Ren, R. G. Maunder, and L. Hanzo, "Taking drones to the next level: Cooperative distributed

- unmanned-aerial-vehicular networks for small and mini drones,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 12, no. 3, pp. 73-82, Sept. 2017.
- [18] T. Jonson, J. Pezeshki, V. Chao, K. Smith, and J. Fazio, “Application of delay tolerant networking (DTN) in airborne networks,” in *Proc. IEEE MILCOM*, pp. 1-7, San Diego, CA, USA, Nov. 2008.
- [19] S. Park, S. Kim, and Y. Yoo, “DTN routing protocol utilizing underwater channel properties in underwater wireless sensor networks,” *J. KICS*, vol. 39, no. 10, pp. 645-653, Oct. 2014.
- [20] D.-T. Ho, E. I. Grøtli, P. B. Sujit, T. A. Johansen, and J. B. D. Sousa, “Performance evaluation of cooperative relay and particle swarm optimization path planning for UAV and wireless sensor network,” in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 1403-1408, Atlanta, GA, USA, Dec. 2013.
- [21] D. H. Choi, S. H. Kim, and D. K. Sung, “Energy-efficient maneuvering and communication of a single UAV-based relay,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 3, pp. 2320-2327, Jul. 2014.
- [22] F. Ono, H. Ochiai, and R. Miura, “A wireless relay network based on unmanned aircraft system with rate optimization,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 11, pp. 7699-7708, Nov. 2016.
- [23] Z. Han, A. L. Swindlehurst, and K. J. R. Liu, “Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3533-3546, Sept. 2009.
- [24] S. Kim, H. Oh, J. Suk, and A. Tsourdos, “Coordinated trajectory planning for efficient communication relay using multiple UAVs,” *Control Eng. Practice*, vol. 29, pp. 42-49, Aug. 2014.
- [25] P. Ladosz, H. Oh, and W.-H. Chen, “Optimal positioning of communication relay unmanned aerial vehicles in urban environments,” in *Proc. IEEE ICUAS*, pp. 1140-1147, Arlington, VA, USA, Jun. 2016.
- [26] 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 ICC*, pp. 1-5, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
- [27] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles,” in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016.
- [28] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, “Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 8, pp. 1647-1650, Aug. 2016.
- [29] G. Tuna, B. Nefzi, and G. Conte, “Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster recovery,” *J. Netw. & Comput. Appl.*, vol. 41, pp. 27-36, May 2014.
- [30] M. Zhu, Z. Cai, D. Zhao, J. Wang, and M. Xu, “Using multiple unmanned aerial vehicles to maintain connectivity of MANETs,” in *Proc. IEEE ICCCN*, pp. 1-7, Shanghai, China, Aug. 2014.
- [31] J. Li, E. Gong, Z. Sun, L. Li, and H. Xie, “Fault-tolerant topology control in aeronautical ad hoc networks,” in *Proc. IEEE ICMA*, pp. 368-372, Tianjin, China, Aug. 2014.
- [32] O. Burdakov, P. Doherty, K. Holmberg, J. Kvarnström, and P.-M. Olsson, “Positioning unmanned aerial vehicles as communication relays for surveillance tasks,” in *Proc. RSS*, Seattle, WA, USA, Jun. 2009.
- [33] C. Dixon and E. W. Frew, “Optimizing cascaded chains of unmanned aircraft acting as communication relays,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 5, pp. 883-898, Jun. 2012.
- [34] E. P. de Freitas, T. Heimfarth, I. F. Netto, C. E. Lino, C. E. Pereira, A. M. Ferreira, F. R. Wagner, and T. Larsson, “UAV relay network to support WSN connectivity,” in *Proc. ICUMT*, pp. 309-314, Moscow, Russia, Oct. 2010.
- [35] Z. Xu, J. Huo, Y. Wang, J. Yuan, X. Shan,

and Z. Feng, "Analyzing two connectivities in UAV-ground mobile ad hoc networks," in *Proc. IEEE CSAE*, pp. 158-162, Shanghai, China, Jun. 2011.

- [36] H. Wang, D. Huo, and B. Alidaee, "Position unmanned aerial vehicles in the mobile ad hoc network," *J. Intell. & Robot. Syst.*, vol. 74, no. 1-2, pp. 455-464, Apr. 2014.
- [37] D. Shallcross and E. van den Berg, "Autonomous location of mobile wireless relay nodes," in *Proc. ICUAS*, pp. 15-24, Arlington, VA, USA, Jun. 2016.
- [38] D.-Y. Kim and J.-W. Lee, "Topology construction for flying ad hoc networks (FANETs)," in *Proc. IEEE ICTC*, pp. 153-157, Jeju Island, Korea, Oct. 2017.

**이 장 원 (Jang-Won Lee)**



1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사

1996년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사

2004년 8월 : Dept. of ECE Purdue University 박사

2004년 9월~2005년 8월 :

Dept. of EE Princeton University 박사 후 연구원

2005년 9월~2010년 8월 : 연세대학교 전기전자공학부 조교수

2010년 9월~2015년 8월 : 연세대학교 전기전자공학부 부교수

2015년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 교수  
<관심분야> 통신망 자원 할당, 통신망 최적화, 통신망 성능 분석

**김 도 엽 (Do-Yup Kim)**



2016년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 학사

2016년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정

<관심분야> 모바일 애드혹 네트워크, 동시 무선 정보 전력 전송 시스템