



# 무인기 활용 공중통신망 발전방향 및 효과도 분석



서난솔  
국방과학연구소  
통신네트워크기술부



이재문  
국방과학연구소  
통신네트워크기술부



최재영  
한국전자통신연구원



이용  
KAIST 전기 및 전자공학부

## I. 서론

현재 군통신망은 무선통신 위주의 지상통신망과 원거리 작전수행을 위한 위성통신망으로 구성되어 있다. 유선기지국 기반의 상용 이동통신망과는 달리 군통신망은 전투전력의 이동전개시 통신망 지원을 위해 간선링크에서 접속링크까지 환경에 맞게 새로이 구성해야하며, 현재 “이동 후 설치(At The Halt)”의 개념으로는 전력의 이동속도를 따라가기 어려운 실정이다. 따라서 “이동간통신(On The Move)”을 위한 통신망 구성 능력이 요구되나 산악지형이 많은 한반도 지형 특성상 무선통신의 통달거리 제약으로 인해 그 실현에는 많은 어려움이 있다. 위성통신망은 지상통신망에 비해 이동성의 제약으로부터는 다소 자유로우나 통신소요대비 용량이 제한적이고, 궤도/주파수 노출에 따른 재밍 가능성이 상시 존재하며, 상대적으로 큰 단말크기(안테나 포함)는 역시 이동성에 약점으로 다가온다. 본 기고문에서는 이러한 기존 통신망의 한계를 극복하기 위한 대안으로서의 무인기를 활용한 공중통신중계의 개념과 그 실현을 위해 깊게 고민해야하는 플랫폼 측면, 기술적 측면의 이슈에 대해 소개하고자 한다.

## II. 공중통신망 필요성

### 1. 기존 군통신망 한계점

미래전은 전장상황 공유, 신속한 명령 전달, 아군의 생존성 향상을 위해 감시정찰체계(센서), 지휘통제체계(의사결정권자), 그리고 정밀타격체계(슈티)를 네트워크화하고 이에 따라 발생하는 대규모 정보 유통을 원활히 하여, 정보 우위의 작전운용수행을 가능케 하는 네트워크중심전(Network Centric Warfare)으로 발전하고 있다. 이러한 NCW구



축을 위해서는 각 체계를 연결시키는 군통신체계 구축이 기본이 되어야하며, 미래 군통신체계 구조는 우주/공중/지해상 계층의 통신망이 유기적으로 결합된 다차원 통합 통신망(Network of Networks) 구조로 발전하고 있는 추세이다. NCW를 구성하는 각 응용체계는 통신망의 노드로써 특정링크를 선택하여 응용에 따른 데이터, 음성, 영상 등의 정보를 교환하게 되는데, 문제는 각 응용계층에서 생산한 정보 유통을 통합통신망 구조에서 얼마나 수용할 수 있을 것인가에 대한 것이며, 현재의 군통신망 구조에서는 증가하는 사용자 요구사항을 충족시키기 어려운 실정이다.

현재의 군통신망 구조는 <그림 1>과 같이 크게 지상에서의 무선링크와 우주계층의 위성링크 위주로 이루어져 있으며 이는 다음과 같은 군작전 운용환경으로부터 기인한다. 전시상황에서 군통신망은 단말 뿐 아니라 통신인프라를 이동시켜야하므로 대부분의 링크를 무선 또는 위성으로 구성하게 되며, 무선통신은 상대적으로 전파특성이 좋은 U/VHF 대역에서의 가시선통신을 주로 사용한다. 그러나 상용의 안정된 환경과는 달리 군통신은 제한된 주파수자원과 다수의 간섭신호를 발생시키는 한반도 지형 특성으로 인해 네트워크의 기본구성단위인 링크의 품질이 매우 열악하다. 무선링크품질의 열화는 통달거리 감소로 이어지며, 짧은 통달거리를 이용한 다중홉 구성이 해결방법으로 제시될 수 있으나 실제 군작전환경에서 노드

간 연결성이 보장될 만큼 노드 밀도가 높지 않고, 또한 연결성이 보장된다 해도 노드수가 증가함에 따라 노드당 전송용량(throughput)이 감소하고 전달시간(delay)이 증가하는 모바일애드혹네트워크(MANET, Mobile Ad-Hoc Network)의 근본적인 문제로 이동성을 지원하는 군통신망의 주요링크 구성으로 지상에서의 무선링크를 활용하는 것은 많은 제약사항이 따른다.

위성통신은 설치속도, 이동성 측면에서 무선통신보다 수월하나 소요대비 용량이 제한되고, 궤도/주파수 노출에 따른 재밍 가능성이 상시 존재하며, 신호 감쇄 과다로 일정 전송속도를 확보하기 위해서는 그에 맞는 안테나크기가 뒷받침되어야 한다. 이와 같은 지상/위성통신망의 각각의 한계점으로 인해 기동간 작전 지역 확대시 적기 통신 서비스 제공의 제한이 예상되므로 그 대안으로서 무인기를 활용한 공중통신중계를 고려할 필요가 있다.

## 2. 대안으로서의 공중통신중계와 연구이슈

지상 무선통신의 통달거리 제약을 극복하고 작전지역 확장을 위한 해결책으로서의 무인기를 활용한 공중통신중계는 운용적 측면과 기술적 측면에서 다음과 같은 이점을 가진다. 먼저 운용적 측면을 살펴보면 무인기라는 플랫폼 특성상 고속 전개 및 지형에 구애받지 않는 중계위치 확보가 가능하며, 무엇보다 무인운용에 따른 아군의 생존성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 무인기 플랫폼 종류에 맞는 적절한 통신장비 선택 및 무인기 체공시간을 고려함으로써 목적에 맞는 네트워크 구성(대용량/소용량 링크, 상시/임시 운용)이 가능함에 따라 탄력적 임무수행이 가능해진다. 무인기 획득 및 유지보수비용 등이 문제로 제기될 수 있으나, 이는 점차 감소하는 병력추세와 이에 대응하기 위한 군자동화/과학화 흐름에 맞물려 진행이 가능할 것으로 판단된다.

기술적 측면으로는 무인기와 지상간 공중통신환경 고려시 상대적으로 채널특성(자유공간 손실, 페이딩)에 대한 예측이 용이하고, 위성대비 적은 신호감쇄로 인해 단말크기의 소형화가 가능하다. 또한 임시운용환경에서 Ad-hoc 네트워크 운용시 상대적으로 안정적인 공중(air-to-ground) 또는 공공(air-to-air) 링크 구성으로



<그림 1> 기존 군통신망(지상통신/위성통신) 한계점



연구명	네트워크 유형	목적	이동노드 수	제어 방식	이동성 방식
Mobility Control	Multi-hop WSN	Connectivity	ALL	Distributed	Adaptive
Adaptive Motion	WSN	Energy consumption	Some	-	Programmed
Distributed Annealing	MANET	Energy consumption	ALL	Distributed	Adaptive
ARLN	WSN	Network lifetime	Single node	-	Programmed
Coverage Behavior / Local Mobility	WSN	Coverage	ALL	Distributed	Adaptive
BELP	WSN	Quality of Coverage	To be computed	Centralized	Programmed
VFA	WSN	Deployment	ALL	Distributed	Adaptive
TARANTULAS	WSN	Localization	Some	Distributed	Adaptive
Joint Mobility and Routing	WSN	Loading balancing	Some	-	Programmed
MURA	DTN	Delivery ratio	Some	Centralized	Programmed
Placement & Scheduling	Multi-hop WSN	Throughput	Single node	Centralized	Adaptive
MES	WSN	No data loss	Some	Distributed	Adaptive
CD	Multi-hop WSN	End-to-end delay	ALL	Centralized	Adaptive

〈그림 2〉 Controlled Mobility를 고려한 기존의 연구들

인해 노드 간 연결성을 관리하고 유지하는데 소요되는 제어 메시지(라우팅 테이블 업데이트 등) 감소가 예상된다. 물론 이는 무인기 대수, 이동속도 및 이동경로와 연결성을 나타내는 1홉 통달거리에 따른 엄밀한 분석이 필요한 부분이나, 일반적으로 무인기의 통신장비 성능이 수십에서 수백km 이상의 통신 통달거리를 가질 것으로 예상됨에 따라 무인기와 무인기, 그리고 무인기와 지상노드 간의 네트워크 구성 변화가 지상에서의 그것만큼 극심하지 않을 것으로 예측 가능하다. 또한 안정적인 채널환경으로 고효율의 변조방식 사용이 가능해짐으로써 주파수효율 측면에서도 공중통신중계의 이점이 존재한다.

운용적, 기술적 측면의 용이함 뿐만 아니라 자유로운 이동제어가 가능한 무인기의 주요 특성으로 인하여 〈그림 2〉와 같은 다음과 같은 네트워크 최적화 이슈에 대한 현실적인 연구개발이 가능해 진다.

- 연결성(Connectivity): 공중에서의 자유로운 이동제어 특성을 갖는 노드를 활용한 네트워크 연결성 보장 목적의 최적화 연구. 무인기를 통한 패킷들의 자유로운 relay를 바탕으로 전시와 같은 급격한 상황에서 고립된 노드를 최소화하고 네트워크의 생존성을 보장하는 무인기 최적배치 알고리즘 설계
- 전력사용(Energy Consumption), 부하분산(Load Balancing): 네트워크에서 소모되는 전체 또는 개별 노드의 전력사용량을 최소화하면서 패킷전송 효율을 높이기 위한 최적화 연구. 네트워크 일부 구간에서 과도한 트래픽 발생 시 특정노드의 전력 사용 증가로 인해 감소하는 네트워크 생존시간을 최대화하는 것을 목적으로 무인기와 같이 이동제어가 가능한 모바일 노드를 적절히 사용하여 전력사용의 효율적 분배를 위한 알고리즘 설계

- 커버리지(Coverage): 연결성과는 별개로 네트워크가 포괄할 수 있는 물리적 영역 범위를 최대화하는 연구. 기존 지상노드에 공중노드를 추가함으로써 커버리지 확장가능성 분석
- 위치추정(Localization): 전파의 자유공간손실(RSSI 측정), TOA(Time Of Arrival), AOA(Angle Of Arrival) 등을 이용, 노드 간 거리측정을 바탕으로 네트워크에서의 특정 노드의 위치를 추정하고자 할 때 전파의 품질이 상대적으로 우수한 공중노드를 활용함으로써 위치추정오차를 줄이기 위한 연구
- 전송률(Throughput): 이는 네트워크의 주요 성능 지표로서 되도록 적은 비용으로 최대의 전송률을 달성하고자 할 때 랜덤으로 움직이는 노드가 아닌 목적에 맞게 잘 고안된 알고리즘에 따라 움직이는 노드가 존재할 경우 전송률 개선이 가능함을 분석
- 지연(delay): 전송률과 마찬가지로 종단간 지연 역시 네트워크 성능의 주요 지표임. 랜덤 모빌리티 대비 적절한 알고리즘에 따라 움직이는 노드를 추가함으로써 지연의 향상 가능성 분석

### III. 공중통신망 플랫폼

무인기는 유인기와 마찬가지로 형상을 기준으로 고정익과 회전익으로 구분된다. 고정익의 경우 고속이동과 상대적으로 긴시간 운용이 가능함에 따라 군에서 감시정찰 및 타격 등의 용도로 운용중에 있으며, 보통 운용고도에 따라 저고도/중고도/고고도 무인기로 분류된다. 회전익은 소형드론(멀티콥터), 멀티로터, 무인헬기, 틸트로터, 복합형 회전익 등 다양한 형상을 가지며, 고정익 대비 저속, 단시간 운용의 단점을 가지나 정밀제어가 용이하다는 측면에서 근래에 들어 다양한 용도로 사용 중에 있다. 통신중계용으로 어떤 형상의 무인기가 적합한가에 대해서는 아직 많은 논의 중에 있으나, 각 형상마다의 장점을 살리는 네트워크 구성 방법이 존재할 수 있다는 것이 중론이다. 가령 고고도 장기체공 무인기의 경우 공중네트워크의 백본링크 구성용으로 사용될 수 있으며, 멀티콥터의 경우 저비용 대량생산이 가능하므로 병사단위까지 보



무인기 구분	형상	요구성능 재량시간/탑재량/속도/오송고도	특성 및 활용도
멀티콥터		~30분 / ~5kg / ~50km/h / 1km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일제방향 전개</li> <li>• 포터 Edge 방향 비행</li> <li>• 소규모 실시간 전송</li> <li>• 통신장비 소형/경량화</li> </ul>
대대급		~120분 / ~10kg / ~80km/h / 4km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1~2인 운용 가능, 대대급 여파 운용</li> </ul>
사단급		~5시간 / ~수십kg / ~100km/h / 6km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이차력보조장비/안정 필요 (발사대/발주포/그물방)</li> </ul>
군단급		~수시간 / ~수십kg / ~수백km/h / 00km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 이/착륙시 활주로 필요</li> <li>• 상대적 고비행</li> <li>• 고장운용인력 다수 소요</li> <li>• (비)군단급 1세프(항공 4석, 지상 1석)</li> <li>• 운용인력 약 100여명 수준</li> <li>• 전술급보다 견직급 적용 유리</li> </ul>
고고도 정기채광		~0개월 / ~000kg / ~ / 20km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2000년대 다수 프로토타입 취소</li> <li>• 연료전지 관련 기술력부족</li> <li>• 발부저 시험 중단 후(-17년)</li> <li>• 광중력본 및 대규모 중계망 고려</li> </ul>
상용프로펠러		~0개월 / ~15kg / ~ / ~	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 레이저통신 이용 약 18km 달항</li> <li>• 통신거리 약 50km / 10Gbps 목표</li> </ul>

〈그림 3〉 무인기 플랫폼에 따른 공중중계 활용 가능성

급하여 전투무선망에서의 음영지역 해소를 통한 ad-hoc 네트워크 구성용으로 적용 가능하다. 무인기 분류에 따른 형상과 플랫폼 성능수준, 그리고 중계노드로써의 가능한 역할에 대해서는 〈그림 3〉과 같이 정리될 수 있다.

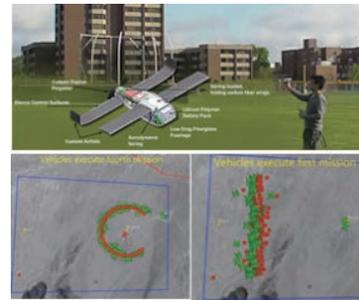
무인기 규모에 따른 통신중계역할과 탑재가능한 현 통신장비 수준은 〈그림 4〉와 같다. 공중네트워크의 접속링크 또는 Ad-hoc형태로 자체네트워크 구성을 위한 용도로써 한국군 전술정보통신체계(TICN, Tactical Information and Communication Network)체계의 전투무선망 무전기인 TMMR(Tactical Multiband Multirole Radio)을 그대로 적용하게 될 경우 대대급 이상의 무인기에 탑재가능할 것으로 판단되며, 소대급 이하 전투원 단위의 사용을 위해서는 상용드론 수준의 소형무인기로의 탑재가 가능한 소형/경량화 작업이 필요하다. 실제 미국의 WIN-T increment3에서는 WNW(Wideband Networking Waveform)의 공중중계를 위해 Small Form Fit 무전기를 추가로 개발하여 적용 중에 있다.

또한 미국의 JALN(Join Aerial Layer Network)의 HCB(High Capacity Backbone)과 같이 군단급 이상의 무인기를 이용하여 공중백본링크를 구성하게 될 경우 현재 군단급 무인기의 1차링크로 사용중인 CDL(Common Data Link)의 적용을 검토해볼 수 있다. 단 3차원 공간상의 중계를 위해 무인기당 최소 3개 이상의 송수신 링크 확보가 필요함에 따라 탑재성을 고려한 송수신 단말, 안테나 개발이 필요하다.

또한 무인기 운용방식에 있어 기존 고성능/다가능 무인



〈그림 4〉 기존 군통신장비의 무인기 탑재가능성



〈그림 5〉 PERDIX 프로젝트(미국방부, MIT 링컨연구소)

기의 단독운용과는 별개로 성능과 기능은 다소 떨어지더라도 저비용/대량생산이 가능한 다수의 소형무인기를 활용하는 전술운용방식이 현재 군관련기관을 통해 검토되고 있다. 무인기 특성상 고위험 작전수행에 대한 요구가 많아지고 실제 전장환경에서 적의 중심부에 침투하여 작전수행 중에 파괴되거나 탈취되는 사례가 발생함에 따라 이런 위험에 크게 부담이 없으면서 동일한 목적 달성을 위한 새로운 시스템에 대한 요구에서 시작되었다. 문제는 다수 무인기 군집운용을 위한 방법인데 중앙의 통제소에서 다수 무인기를 일일이 제어하고 관리하는 방식은 무인기 수에 비례하여 통신자원을 소모하게 되고, 또한 중앙과의 통신링크 두절 시 시스템 작동이 중단되는 치명적인 단점을 가진다. 따라서 분산화된 구조하에서 최소한의 정보교환을 통해 고유의 판단을 가지는 개별 무인기의 행동이 전체 군집의 목적 달성에 기여할 수 있는 시스템 개발이 필요하며 미국 등 선진국에서 일부 기술이 개발되어 시연 단계까지 완료되었다. 일례로 미국 전략능력실(SCO, Strategic Capabilities Office)에서는 MIT 링컨

연구소와의 협력을 통해 PERDIX 프로젝트를 수행하였고, 지난 2016년 10월 F/A-18 전투기에서 103대의 고정익 소형무인기를 투하시켜 군집비행 시연을 실시하였다. 공개된 자료에 의하면 MIT 링컨연구소에서 2010년 프로젝트 수업형태로 시작되어 최초 목적은 대기 측정을 위한 초소형 드론의 설계 및 제작에 있었다. 2013년부터 미국방부 지원하에 군사적 용도로 성능개량이 진행되었고, 2015년 자율임무수행을 위한 알고리즘 개발 및 비행성능향상이 이루어졌다. 그러나 많은 부분이 분산/자율로 이루어진다해도 최소한의 임무정보 및 상태정보 교환을 위해 군집 무인기 간 통신망 구성이 필요하며, 이와 같은 시스템을 대비하여 국방과학연구소와 KAIST에서는 다수 무인기간의 공중네트워크 구성을 통해 무선 멀티홉 환경에서 데이터송수신을 위한 기본적인 시스템을 구축하였다. 이와 관련한 기술적인 부분은 IV-2장에서 좀더 자세히 다루도록 한다.

## IV. 무인기 활용 공중통신망 구조도출 및 분석

### 1. 지상/공중 통합통신망

TICN 통신망에 공중통신중계를 적용하는 시나리오에 대한 연구는 2008년 육군정보통신학교에서의 연구를 시작으로 기품원, 육군본부 등 다양한 기관에서 고유의 관점으로 연구가 진행되어 왔다. 정통교 연구(UAV체계구조 및 운용성능 검증)에서는 VHF-FM 및 WNW의 운용에 있어서 지상중계와 공중중계 각각에 대한 통화성공률 및 종단간 지연시간에 대한 분석을 수행하였으며, 공중중계시 두 가지 성능에 대한 개선점을 확인하였으나 공중노드의 부하가 고려되지 않았고, TMMR의 구체적인 기술이 적용되지 않는 등 다소 제약적인 분석으로 진행되었다. 2012년 기품원 연구(UAV중계형 지상기반 MANET의 야전운용성능 최적화 모의분석 모델개발)에서는 운용개념, 전장통신환경, 운용트래픽을 반영하여 연결성 및 전송성공률 관점에서의 MANET 최적성능을 분석하였으며, 파라미터 최적화를 통해 공중중계 사용시 67%의 전송성공률 개선이 있음을 보였다. 그러나 이 역시 상용의

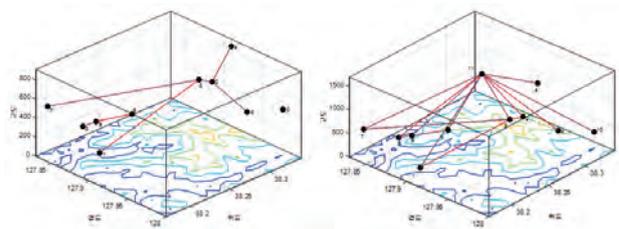
IEEE802.11 규격에 라우팅 프로토콜로써 AODV를 적용하는 등 실제 TMMR의 적용 기술로써 분석이 되지 않은 점이 한계라 할 수 있다. 13년 육군본부(통신중계용성충권 비행선 운용필요성과 획득방안)에서는 TICN 및 위성중계기로서의 성충권 비행선의 적용 가능성을 연구하였으며, 그 결과로 TICN의 무선간선링크를 구성하는 HCTR(High Capacity Transit Radio)을 활용한 공중간선망 구축을 통해 전술이동통신체계(MSAP/TMFT)의 중계 가능성을 제시하였다.

앞서의 연구결과를 바탕으로 국방과학연구소에서 수행한 “우주/공중기반 기동통신망 개발가능성 연구(14~16)”에서는 TMMR 등 지상노드의 규격을 현실화하고, 무인기 구분(저고도/중고도)에 따른 공중중계노드를 모델링하여 그에 따른 효과도 분석을 수행하였다.

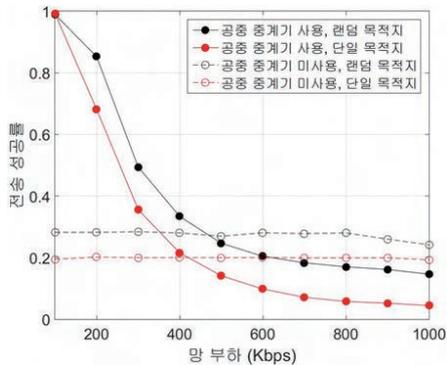
#### 1-1. 연결성/부하 측면 공중중계효과도 분석

먼저 TICN 배치 환경에서 무인기 중계에 따른 효과도 분석에 앞서 일반적인 단일노드모델환경에서 공중중계에 따른 분석을 수행하였다. 단일노드의 물리계층, 데이터링크계층의 규격은 IEEE802.11을 가정하였다.

〈그림 6〉과 같이 한반도 산악지형 환경에서 10km<sup>2</sup> 내 10개 노드를 무작위 배치하여 1km 고도에서 1개의 공중중계노드가 있는 경우와 없는 경우에 대해 분석하였다. 공중중계노드 미보유시 노드 간 연결성은 약40%수준이며, 총네트워크 용량의 29%의 사용률을 보였다. 공중중계노드 보유시 약90%이상의 연결성과 99%의 네트워크 부하를 확인하였으며, 부하의 40%는 공중중계노드에 집중되었다. 연결성 측면에서 예상대로 공중중계활용 시 획기적인 성능개선이 있었지만 일반적인 라우팅 프로토콜 사용 시 지상링크 대비 채널품질이 좋은 공중링크에 부하



〈그림 6〉 공중중계 유(우)/무(좌)에 따른 연결성 분석



〈그림 7〉 공중중계기 사용 유무 및 목적지의 패턴에 따른 전송성공률

〈표 1〉 지형 및 트래픽 부하에 따른 전송 성공률 및 종단간 지연 측정 결과

지형 프로파일	트래픽 부하	공중 중계기	전송 성공률	종단간 지연
평야 지형	낮은 트래픽 부하	O	92.75%	115 msec
		X	79.01%	255 msec
	높은 트래픽 부하	O	92.75%	2,549 sec
		X	79.01%	2,443 sec
구릉지 지형	낮은 트래픽 부하	O	98.76%	111 msec
		X	98.84%	117 msec
	높은 트래픽 부하	O	51.48%	2,543 sec
		X	49.11%	2,321 sec
산악 지형	낮은 트래픽 부하	O	80.00%	237 msec
		X	10.29%	172 msec
	높은 트래픽 부하	O	17.64%	2,811 sec
		X	9.94%	0,046 sec

가 쓸림에 따라 정보유통량을 변화시키면서 전송성공률과 지연시간에 대한 분석을 추가로 수행하였다.

분석 결과 〈그림 7〉과 같이 네트워크 부하가 낮을 경우 연결성 분석과 유사하게 공중 중계기를 사용하는 경우 전송 성공률의 측면에서 공중중계기의 이점을 확인할 수 있었다. 또한, 트래픽의 목적지가 랜덤일 경우가 그렇지 않을 경우에 비해 더 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 네트워크 부하가 증가할 경우 〈표 1〉과 같이 공중 중계기를 사용할 때 처리량이 감소하고 종단 지연 및 접속 지연이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공중 중계기를 사용할 때 충돌이 빈번하게 발생하여 재전송 횟수가 늘어나기 때문이며 충돌 발생의 주요 원인은 공중 중계기에서 병목 현상이 발생하기 때문이다. 특히, 목적지가 하나일 경우 병목점이 공중중계기와 수신단

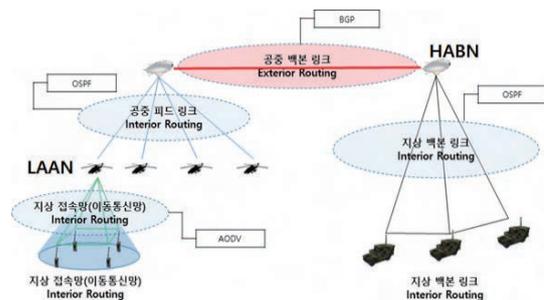
말에서 발생하여 그 이점이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 분산망 환경에서 공중 중계기를 사용할 경우 MAC(Medium Access Control)계층에서의 효과적인 충돌 회피 기술, 공중 중계기 자원 할당 기술, 공중 중계기 부하 분산 기술의 개발이 요구된다.

1-2. 지상/공중 통합통신망 효과도 분석

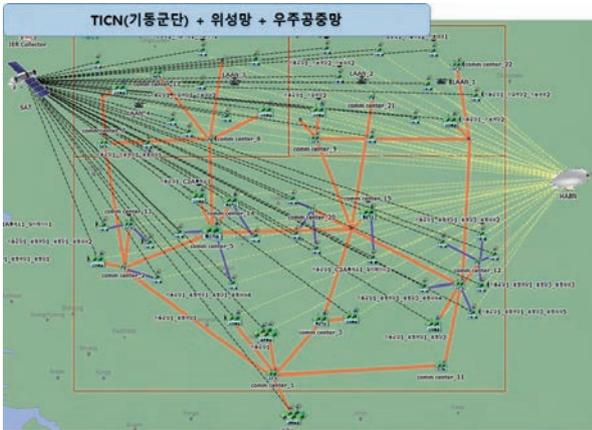
TICN기반의 지상통신망과 무인기 기반의 공중통신망과의 통합망 구성을 위해 국방과학연구소와 한국통신학회 산하 공통신연구회는 “우주/공중기반 기동통신망 개발가능성 연구”를 통해 〈그림 8〉와 같은 네트워크 구조를 도출하였다.

무인기 기반 공중통신망은 고고도에서 백본링크를 구성하는 HABN(High Aerial Backbone Node)과, 중고도에서 지상노드에 대한 Access Point 역할을 하면서 HABN과 연결되는 LAAN(Low Aerial Access Node)으로 구성된다. TICN의 지상노드는 형상에 따라 LAAN에 접속하여 망에 연결하거나 HABN을 통해 백본과 직접 연결될 수 있다.

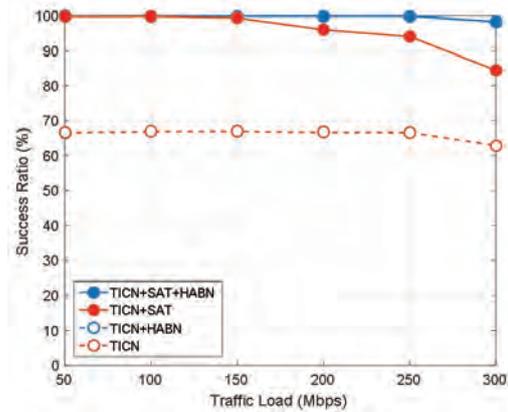
공중지상 통합통신망 효과도 분석을 위해 〈그림 9〉와 같은 토폴로지에서 OPNET을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 공중노드의 통신장비는 지상의 TICN 구성장비와 연동이 되면서 사용자 정보교환요구(IER, Information Exchange Requirement)를 충족하거나 미래의 예상되는 요구수준을 반영한 가상의 성능규격을 정의하여 적용하였다. 먼저 MANET 환경으로 구성되어 지상노드의 통신을 지원하는 LAAN의 접속 링크는 전술통신망에서 사용하는 AODV (Ad-Hoc On-



〈그림 8〉 지상/공중 통합통신망 구조



〈그림 9〉 지상/공중 통합통신망 구조 분석을 위한 토폴로지



〈그림 10〉 지상/공중 통합통신망 구조에 따른 전송 성공률

demand Distance Vector) 라우팅 프로토콜을 적용하였다. AODV 라우팅 프로토콜은 전송할 패킷이 있을 경우에만 라우팅 테이블을 업데이트하여 불필요한 제어패킷 증가를 억제하는 On-demand 방식의 라우팅 프로토콜로써 라우팅 오버헤드를 감소시킬 수 있으나 트래픽이 발생한 시점에서 라우팅 경로를 탐색하기 때문에 연결 지연이 높은 단점을 가지고 있다.

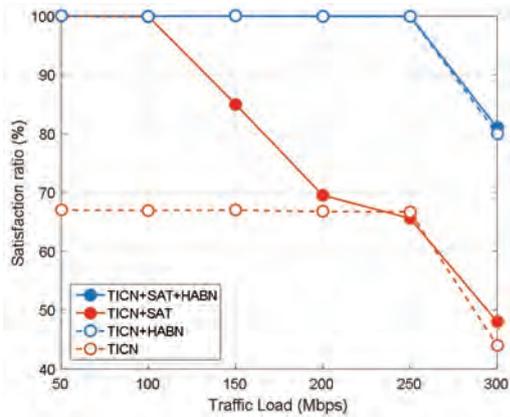
LAAN과 HABN사이의 링크 및 HABN과 지상노드 단말 사이에서는 Interior Routing 알고리즘인 OSPF (Open Shortest Path First) 라우팅 프로토콜을 적용하였다. OSPF 프로토콜은 모든 링크의 상태를 주기적으로 교환하여 모든 라우터가 최적의 경로를 항상 유지하는 Proactive 방식의 라우팅 알고리즘으로 항상 라우팅 테이블이 유지되기 때문에 연결 지연이 낮은 장점을 가지고 있다. 그러나 항상 라우팅 테이블을 유지하기 위하여 주기적으로 라우팅 정보를 교환해야 하므로 라우팅 오버헤드가 높은 문제가 있다. LAAN과 HABN 사이의 피드 링크 또는 HABN과 지상단말 사이의 지상 백본 링크는 지상단말과 LAAN 사이의 접속 링크에 비해 전송속도가 높아 라우팅 오버헤드를 고려할 필요가 낮다. OSPF 라우팅 알고리즘은 TICN망뿐만 아니라 군위성-II에서도 적용되는 알고리즘이므로 타망과의 연동에 유리한 장점을 가지고 있다.

마지막으로 HABN간에는 Exterior Routing 알고리즘인 BGP (Border Gateway Protocol) 라우팅 프로토콜을 적용하였다. 하나의 HABN은 군단 규모의 네트워크에서

통신을 제공하는 단말로 군단 단위로 배치될 것으로 예상된다. 군에서는 TICN이나 군위성-II에서는 군단 단위로 AS (Autonomous System)를 구분하고 있으며 타군단으로 트래픽을 전송할 경우 BGP 라우팅 프로토콜을 적용하고 있다. 따라서 우주/공중 기반 기동통신망에서도 HABN간에는 BGP 라우팅 프로토콜을 적용하였다.

공중통신중계에 대한 효과도 분석의 지표로써 전송성공률과 패킷전달의 적시성을 고려하였다. 〈그림 10〉은 망구조에 따른 전송성공률을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과와 현재 IER과 동일한 트래픽 부하에서 TICN망의 전송 성공률은 66.64%이며, 이는 전방 사단의 부대통신소와 후방 지상망간의 연결이 지형장애로 인해 단절되어 있기 때문이다. 반면 위성 또는 공중통신망이 있는 시나리오에서는 99% 이상의 전송성공률이 측정되었다. 트래픽 부하를 증가시켜 현재 IER의 600%인 300 Mbps의 경우 TICN망과 위성망이 공존하는 시나리오에서 전송성공률이 낮아지는 것을 확인할 수 있는데 이는 트래픽 부하가 증가하면 먼저 위성망에 병목현상이 발생하고 종단간 전송지연이 급격히 증가하여 패킷이 가지는 지연만족수준 (latency) 안에 수신이 되지 않고 패킷 드랍이 때문이다. 반면 공중통신망이 있는 경우 트래픽 부하 증가 시에도 전송성공률이 99%수준으로 유지됨을 확인할 수 있다.

〈그림 11〉은 망구조에 따른 전송성공률을 고려한 적시성 만족률을 나타내고 있다. 적시성은 정상적으로 수신된 패킷에 대하여 지연 만족 기준을 준수한 패킷의 비율로서 이는 체계 및 기능에 따라 달라질 수 있다. TICN망의



〈그림 11〉 지상/공중 통합통신망 구조에 따른 적시성 만족률

경우 전송성공률을 고려한 적시성 만족률은 현재 IER의 300%인 150Mbps이내에서는 66%를 만족하였으나 현재 IER의 600%인 300 Mbps에서는 중단간 전송 지연의 증가로 인해 44%까지 감소하였다. 반면 TICN망과 위성망이 공존하는 환경의 경우 현재 IER 수준의 트래픽 부하에서는 전송성공률을 고려한 적시성 만족률이 100% 였으나 트래픽 부하가 증가함에 따라 선형으로 감소하는 것으로 측정되었다. 이는 위성망에서 병목현상이 발생하기 때문이다.

공중통신망이 있는 시나리오의 경우 위성망의 유무와 상관없이 현재 IER의 300%까지는 전송성공률을 고려한 적시성 만족률이 100%에 가깝게 측정되었으나 600%로 트래픽 부하가 증가할 경우 80%까지 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 HABN으로 연결된 링크 중 일부 링크로 전달되는 트래픽이 많아 병목현상이 발생하기 때문이다.

## 2. 집단군집 소형무인기 통신망

KAIST와 국방과학연구소에서는 앞서 시뮬레이션을 통해 확인한 공중통신망의 효과도를 무인기와 통신용량 측면에서 scaled-down하여 실환경 테스트베드 구축을 통해 검증하고, 별도의 응용으로써 소형무인기의 대규모 군집비행을 활용한 공중 Adhoc 통신망의 실효성을 확인하는 목적의 연구를 수행하였다. 집단군집 소형무인기 통신망의 전반적인 시스템 구조는 지상관제서버(GCS, Ground Control Server)로부터 다수의 군집 무인기가 임무 수신 후 중앙 또는 분산 알고리즘에 의해 세부임무



〈그림 12〉 음영지역 해소를 위한 무인기 최적배치



〈그림 13〉 공중멀티홉 구성 실환경 시험

할당계획을 세우고 이에 따라 공통의 목적 달성을 위해 각 무인기가 최적의 행동을 취하는 구조로 도출되었으며, 최종적으로 테스트베드를 통해 이에 대한 실환경 검증시험을 수행하였다.

### □ 무인기 최적배치 시나리오

〈그림 12〉의 좌측과 같이 한반도 산악지형으로 인해 지상통신망을 통한 제대간 연결성이 확보되지 않는 상황에서 무인기를 통한 공중중계시 음영지역을 최소화하기 위한 무인기 최적배치 시험을 수행하였다. 통신거리에 따라 드론의 이동거리가 제한되므로 공중에서의 멀티홉 구성을 통해 최대통달거리 달성하면서 지상노드와의 연결성을 확보하기 위한 노드배치가 수행되었고, 무인기 체공시간이 제약조건으로 설정되어 일부 무인기가 체공시간 안에 목적지에 도착할 수 없는 경우 목적지 근처에 있는 다른 드론을 드론 간 자율판단에 의한 통신을 통해 이륙시킨 후 드론군집에 포함시켜 전체 임무 수행을 달성하는 과정을 실환경 시험을 통해 확인하였다.



〈그림 14〉 부하분산을 위한 무인기 배치



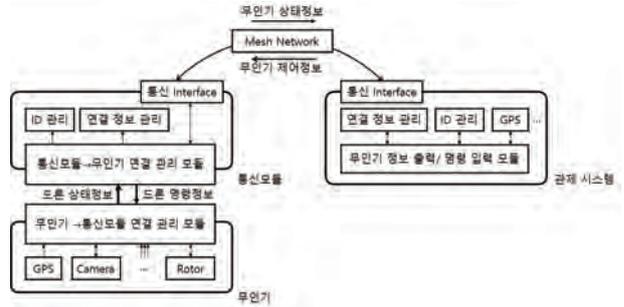
〈그림 15〉 공중통신망 테스트베드

□ 부하분산 시나리오

최적배치가 이루어진 상태에서 〈그림 14〉와 같이 특정 노드에서 동영상 전송 등 과도한 부하가 발생한 경우 부하 분산을 위한 토폴로지 변경을 단순 논리적인 라우팅 변경이 아닌 중계 무인기의 물리적 이동을 통한 주파수 공간적 재사용을 고려하는 배치되는 과정을 수행하였다. 이는 공중이동에 따른 자유로운 위치 선택이 가능한 공중 중계만의 장점이며, 지상노드만을 이용해서는 이와 같은 시나리오가 실작전환경에서 수행되기는 매우 어렵다.

□ 테스트베드 구축

무인기 테스트베드는 〈그림 15〉와 같이 크게 무인기와 통신장비의 두 가지 모듈로 구성 되어있다. 본 테스트베드에서는 다수의 군집무인기를 하나의 관제서버를 통해 제어해야 하므로 일반적인 Point-to-Point 방식의 상용 무인기 제어시스템을 활용하지 않고, 무인기에 추가적인 통신 모듈(Single Board Computer+RF transceiver)을 탑재한 후 무인기 FCS(Flight Consrol System)와의 연동을 통해 다수 무인기의 단일 시스템 제어가 가능하도록 구축하였다. 무인기로는 On-board SDK가 제공되는



〈그림 16〉 공중통신망 시스템 아키텍처



〈그림 17〉 GCS 구성 화면

DJI사의 Matrice100을 이용하였다.

무인기와 통제서버 간의 제어 및 상태정보의 교환은 〈그림 16〉과 같은 아키텍처로 이루어져 있다.

관제서버와 무인기 또는 무인기간 통신을 위해 탑재된 SBC는 Ad-hoc 네트워크 구성을 위해 Linux OS에서 기본적으로 제공되는 Iw 명령어 (무선 네트워크 컨트롤 명령어)를 조합한 Script를 구성하였다. 해당 Script 내에는 Ad-hoc 네트워크에서의 라우팅을 위한 B.A.T.M.A.N 프로토콜이 포함되며 이는 Layer2에서의 라우팅을 위한 프로토콜이다. SBC에 장착되는 RF통신장비로는 SigFox 와 LoRa와 같은 사물인터넷(IoT, Internet of Things) 통신장비 및 WiFi, LTE 등을 사용목적에 맞게 장착할 수 있으며, 해당 실험에서는 2.4GHz 또는 5GHz대역을 사용하는 WiFi (IEEE802.11ac) 모듈을 사용하였다.

통신모듈 구성과 더불어 모든 무인기를 조종통제하기 위한 지상관제서버(GCS)의 구성은 〈그림 17〉과 같다.

GCS는 지도 및 좌표정보호출, 접속정보관리, 무인기상태정보관리, 임무명령과 같이 총 4가지 기능을 수행하며 각각의 세부 기능은 다음과 같다.



첫째로 지도 및 좌표정보호출은 Google사에서 제공하는 위성사진을 가지고 오는 역할을 하며 위성사진의 특정 포인트를 선택하여 좌표를 얻어올 수 있고, 이를 통해 무인기를 해당 위치로 이동시킬 수 있다.

접속정보관리는 서버에 각 무인기의 조종을 위한 클라이언트 프로그램이 접속을 하고, 통신을 진행하는 일련의 정보들을 출력한다. 정보들의 종류로는 무인기의 server로의 접속과 단절 히스토리, 현 위치정보와 같은 상태정보, 마지막으로 이동/이륙/착륙 등의 Command 전송 정보를 기록한다.

무인기상태정보관리는 무인기의 상태정보와 해당 무인기와 연결관계에 있는 노드의 상태정보(위치, h/w식별번호 등)를 출력한다.

임무명령은 다수 무인기의 조종 및 임무할당명령을 위한 기능으로 이륙, 위치변환, 착륙, 귀환 등을 포함한다.

## V. 결론

현재 지상/위성 중심의 군통신망 구조의 한계를 극복하고 다가오는 NCW환경에서의 통합통신망 구현을 위해서는 공중계층에서의 무인기를 활용한 공중통신망 구현이 선택이 아닌 필수라 할 수 있다. 본 기고문에서는 공중통신망의 운용적, 기술적 관점의 필요성을 제시하고 고고도 무인기부터 소형 군집드론까지 다양한 무인기 플랫폼을 활용한 공중통신망 구축 시 각각에 대한 구체적 방안과 이에 따른 통신관점에서의 효과도 분석을 시뮬레이션 또는 실험베드 구축을 통해 수행한 연구를 소개하였다.

계속 감소하는 군인력과 AI기술의 급진적 발전과 더불어 한국군에서의 무인체계 활용은 대세이며 군통신망의 무인화 역시 예외라 할 수 없다. 조속히 무인체계를 활용한 통신망 구축사업이 시작되어 현재의 유인 운용 군통신망과 무인체계 통신망 간의 통합은 물론 최종적으로 모든 통신체계가 자동으로 구축되고 운용되어 전장에서 우리의 고귀한 생명을 지킬 수 있는 그런 기술개발을 기대한다.

## ACKNOWLEDGMENT

해당 연구는 국방과학연구소 통합운용 무인기 조종통제데이터링크 표준기술 개발 과제(UD160006ED)의 지원을 받아 수행됨

### 참고 문헌

- [1] 통신중계용 성층권비행선 운용필요성과 획득방안, 안보경영연구원, 2013.
- [2] 박영규, 김세일 "UAV 중계형 지상기반 MANET의 야전운용성능 최적화 모의분석 모델 개발", 국방기술품질원
- [3] 배기형 "세계 주요국의 무인항공기 개발현황과 국내개발 필요성" 항공산업연구 제62집, pp 70-87, 2002.08
- [4] Department of Defence, "Unmanned System Integrated Roadmap FY2013-2038", 2013.
- [5] DoD CIO, "Department of Defense Global Information Grid Architectural Vision", 2007.
- [6] Joint Chiefs of Staff, "Joint Concept for Command and Control of the Joint Aerial layer Network", 2015.
- [7] USAF, Airborne Network Architecture, 2004.
- [8] BACN, <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/bacn/Pages/default.aspx>
- [9] WIN-T Increment 3, [http://www.ndia.org/divisions/divisions/c4isr/documents/492c\\_brief.pdf](http://www.ndia.org/divisions/divisions/c4isr/documents/492c_brief.pdf)
- [10] DARPA, "Advanced Airborne Networking Capabilities Sought for Hostile Environments", 2015.
- [11] 우주/공중 기반 기동통신망 운용개념 조사분석 및 Target 서비스 도출, 국방과학연구소보고서, 2016
- [12] 우주/공중 기반 기동통신망 운용에 따른 효과도 분석용 시뮬레이터 제작, 국방과학연구소보고서, 2016
- [13] 강완주, 김세은 외, "Onboard-SDK를 이용한 드론 Ad-hoc Mesh Network 구현," JCCI, 2016
- [14] E.Natalizio, V.Loscri, "Controlled Mobility I mobile sensor networks: advantages, issues and challenges," Telecommun Syst(2014) 52:2411-2418



서난솔

- 2006년 2월 연세대 전기전자공학부 학사졸업
- 2008년 2월 연세대 전기전자공학부 석사졸업
- 2008년 2월~현재 국방과학연구소 통신네트워크기술부 선임연구원

〈관심분야〉  
무선통신네트워크, MANET, 무인기데이터링크



이웅

- 1997년 2월 서울대 컴퓨터공학부 (학사)
- 1999년 2월 서울대 컴퓨터공학부 (석사)
- 2006년 8월 University of Texas at Austin, USA 전기컴퓨터공학부 (박사)
- 2008년 8월~현재 KAIST 전기전자공학부 교수
- 2009년 3월~2014년 8월 KAIST 전산학부 겸임교수
- 2006년 8월~2008년 8월 Princeton Univ. 전기전자공학부 (박사 후 연구원)

〈관심분야〉  
무선통신네트워크, 머신러닝



이재문

- 2000년 2월 한양대학교 전기전자공학부 (학사)
- 2002년 2월 한양대학교 전기전자공학부 (석사)
- 2016년 8월 아주대학교 컴퓨터공학과 (박사)
- 2002년 2월~현재 국방과학연구소 통신네트워크기술부 선임연구원

〈관심분야〉  
무선통신네트워크, 무인기데이터링크



최재영

- 2008년 8월 고려대학교 수학과 (학사)
- 2013년 2월 고려대학교 수학과 (석사)
- 2014년 3월~현재 KAIST 전기전자공학부 박사과정

〈관심분야〉  
무선통신네트워크, 머신러닝