



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(12), 971-980(2021)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.12.971

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

소형 고정익 무인기 군집비행 기술 연구

명현삼¹, 정준호¹, 김도완¹, 서난솔¹, 김용빈², 이재문², 임홍식³

Research of Small Fixed-Wing Swarm UAS

Hyunsam Myung¹, Junho Jeong¹, Dowan Kim¹, Nansol Seo¹, Yongbin Kim², Jaemoon Lee²
and Heungsik Lim³

Agency for Defense Development

ABSTRACT

Recently popularized drone technologies have revealed that low-cost small unmanned aerial vehicles(UAVs) can be a significant threat to prevailing power by operating in group or in swarms. Researchers in many countries have tried to utilize integrated swarm unmanned aerial system(SUAS) in the battlefield. Agency for Defense Development also identified four core technologies in developing SUAS: swarm control, swarm network, swarm information, and swarm collaboration, and the authors started researches on swarm control and network technologies in order to be able to operate vehicle platforms as the first stage. This paper introduces design and integration of SUAS consisting of small fixed-wing UAVs, swarm control and network algorithms, a ground control system, and a launcher, with which swarm control and network technologies have been verified by flight tests. 19 fixed-wing UAVs succeeded in swarm flight in the final flight test for the first time as a domestic research.

초 록

최근 드론 기술의 대중화와 함께 저비용의 소형 무인기를 다수 또는 군집으로 운용함으로써 상당한 군사적 효용성을 얻을 수 있음이 알려지면서, 군집무인체계의 전장 활용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국방과학연구소에서는 이와 관련한 주요기술로 군집제어, 군집통신, 군집정보, 군집협업 기술을 식별하였으며, 1단계로써 대상 무인체를 운용하는 데 필요한 군집제어와 군집통신 기술에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 소형 고정익 무인기 기반의 군집무인기시스템을 설계 및 제작하고, 군집제어 및 군집통신 기술을 비행시험으로 검증한 과정을 소개한다. 최종 비행시험에서 무인기 19대가 군집비행을 수행함으로써 국내 최초로 군사적으로 활용도가 높은 고정익 무인기 약 20대 규모의 군집 비행시험에 성공하였다.

Key Words : Swarm Unmanned Aerial System(군집 무인기 시스템), Swarm Control(군집제어), Swarm Network(군집통신), Fixed-Wing UAV Swarm Flight(고정익기 군집비행)

1. 서 론

현대 항공전에서 무인항공체계는 기술발전의 결과

로 다양하면서도 핵심적인 역할을 하고 있다. 글로벌 호크와 같이 고성능의 대형 무인항공기뿐 아니라 민간에서 영상 촬영, 농약 살포, 레저 등에 활용되는 소

† Received : August 16, 2021 Revised : October 23, 2021 Accepted : November 25, 2021

¹ Senior Researcher, ^{2,3} Principal Researcher

³ Corresponding author, E-mail : heung0@add.re.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

형 무인기(드론)도 군사적 활용 가능성이 높아지고 있다. 특히 2018년 시리아 무장세력이 13대 소형 무인기를 이용하여 시리아 주둔 러시아 공군기지를 공격한 사례, 2019년 사우디아라비아 정유시설 피격 사례 등은 다수의 저가 무인기를 활용하여 고성능의 단일 무인기 능력 이상으로 군사적인 효용성을 가질 수 있음을 직접적으로 보여주었다. 무인기 군집 운용의 효용성을 일찍이 간파한 여러 나라에서 군집 무인기 관련 연구가 다양하게 진행되어왔다. 이 분야 연구의 선두 국가인 미국에서는 2010년대에 들어서 미해군연구소가 주도하는 LOCUST(Low-Cost UAV Swarming Technology) 프로그램, 미 국방성 전략성능실이 주도하는 Perdix 프로그램, DARPA가 주도하는 Gremlin 프로그램을 각각 성공적으로 수행한 바 있다. 중국에서는 Perdix 프로그램에 자극받아 중국 전자기술그룹(CETC)이 2017년 119대 군집 비행을 성공하였다. 2016년 스웨덴과 노르웨이군은 러시아군으로 추정되는 10대 이상의 드론이 NATO 군사훈련을 정찰하였다고 밝힌 바가 있어 러시아도 유사 연구를 수행하였을 것으로 추정된다[1].

국방과학연구소에서도 2017년 여러 로봇과 같은 무인인동체를 군집으로 운용하기 위한 기술에 주목하고, 연구개발 방향을 설정하였다. 군집무인체계를 '정보 교류가 가능한 다수의 무인체가 통합 운영되어 더 나은 성능을 낼 수 있는 다수 무인체의 통합체계'라고 정의하고, 이를 가능케 하는 것이 '군집 지능(Swarm Intelligence)'이라고 보았다. Fig. 1과 같이 '군집지능'을 이룰 수 있는 주요 기술 영역을 '군집제어(Swarm Control)', '군집통신(Swarm Network)', '군집정보(Swarm Information)', '군집협업(Swarm Collaboration)' 4개로 분류하였다[2].

'군집제어'는 구성체 또는 장애물과의 충돌을 회피하면서 상호간에 근접하여 비행하는 군집 비행제어 기술과 군집의 형상이나 전체 구성체의 움직임을 제어하는 기술을 의미한다. '군집통신'은 구성원 간 정보 공유를 위한 망 구성기술과 이동 특성을 고려한 신속한 재구성이 가능한 분산형 통신망 기술 등을 포함한다. '군집정보'는 각 구성체가 획득한 데이터를 공유하고 융합하여 정보를 생성하거나 구성체 스스로 상황을 인식하는 기술 등이다. '군집협업'은 시간에 따라 변하는 환경에 대응하여 임무와 수행할 작업을 실시간으로 분담하여 할당하는 기술을 뜻한다. 이상의 4대 주요기술들이 서로 유기적으로 융합될 때 더 나은 성능을 발휘할 수 있는 '군집지능'이 구현될 수 있다.

본 연구는 군집무인체계를 무기체계화하기 위한 관점에서 필요한 핵심 기술을 확보하고자 하는 첫 번째 단계로써 Fig. 1과 같이 식별한 4가지 주요 기술 중 대상체의 운용을 위해 가장 먼저 필요한 군집제어와 군집통신 기술 확보를 목표로 하였다. 동일한 임무 명령에 의해 분산형으로 동작하는 군집제어 기

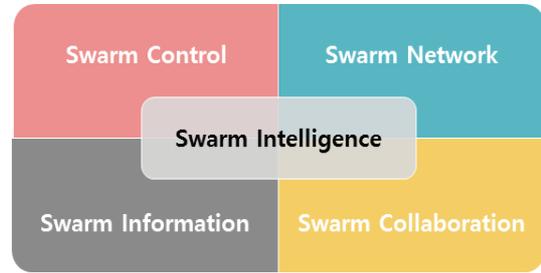


Fig. 1. Four core technologies of swarm unmanned aerial system

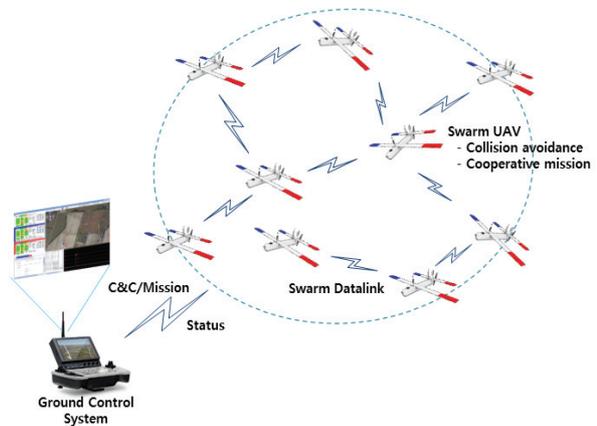


Fig. 2. Scope of the program

술과 기반 통신 시설 없이 망을 구성하는 분산형 군집통신 기술을 연구하고, 장거리 운용이 가능하여 군사적으로 활용도가 높은 고정익 무인기를 활용하여 국내 최초로 약 20대 규모의 고정익 무인기 군집 비행시험에 성공하였다.

본 논문에서는 Fig. 2와 같이 연구 범위를 설정한 후 소형 무인기 시스템을 설계하고 개발된 군집제어 및 군집통신 기술을 통합하여 비행시험으로 검증한 결과를 소개하고자 한다. 본문의 구성은 다음과 같다. 비행시험 시나리오, 시스템 모드, 정보 교환의 개념을 군집 무인기의 운용을 고려하여 새롭게 정의하였고, 이를 바탕으로 설계한 군집제어와 군집통신 알고리즘을 간략히 소개하였다. 다수 무인기를 신속히 전개하는 개념을 비행체에 적용하기 위해 형상설계 연구를 수행하였고, 탑재 시스템 및 지상통제장비, 무인기 이륙을 위한 발사장비도 설계, 제작하였으며, 주요 설계 주안점을 소개하였다. 마지막으로 '20년 5월 19대 무인기의 군집 비행'을 통해 군집제어와 군집통신의 성능을 확인한 결과를 제시하였다.

II. 본 론

2.1 시스템 설계

군집제어 및 군집통신 기술을 비행시험을 통해 검

증하기 위한 목적으로 테스트베드 개념의 소형 고정익 무인기 시스템을 설계하였다. 본 절에서는 구현하고자 하는 시스템의 운용개념과 임무, 교환정보를 정의한다. 이를 통해 군집제어와 군집통신 기술의 개념과 설계 요구사항이 도출된다.

2.1.1 운용개념

군집비행을 위한 소형 무인기 시스템은 하나의 지상통제장비로 다수의 무인기를 동시에 통제하며, 지상-무인기 간 통신과 무인기-무인기 간 통신이 가능하도록 설계된 군집통신장비를 포함한다. 무인기들은 자신의 위치, 속도 등의 상태정보를 주기적으로 전송하고 타 무인기 정보들을 수신한다. 이 정보는 무인기간 지속적인 충돌회피, 근접비행을 위한 유도 명령 생성에 사용된다. 지상통제장비는 임무(비행패턴) 명령, 모드 변환 명령 등을 운용자의 운용에 따라 무인기에 비주기로 송신하고, 각 무인기의 상태정보를 주기적으로 수신한다.

제한된 시간 동안 다수의 무인기를 동시에 운용하기 위해서 비행체는 발사대를 이용한 초기 가속을 통해 이륙하고, 기능면으로는 자동 경로점 비행과 자동 착륙이 가능하도록 하였으며, 착륙 시에는 바퀴나 스키드가 없는 비행체 형상을 선정하여 동체 배면으로 자동 착륙하도록 한다(Fig. 3).

무인기가 군집 운용을 통해 수행할 임무들을 생각해 보면 주로 협업을 통한 정찰과 감시, 공격 임무가 예상되며, 이를 위해 요구될 비행 형태를 가정하여 Fig. 4와 같이 네 가지의 비행 패턴을 선정하였다.

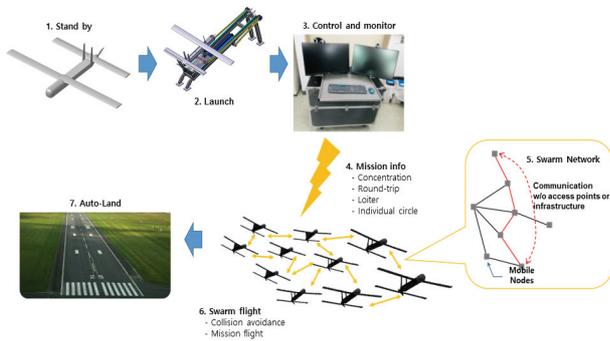


Fig. 3. Test Scenario

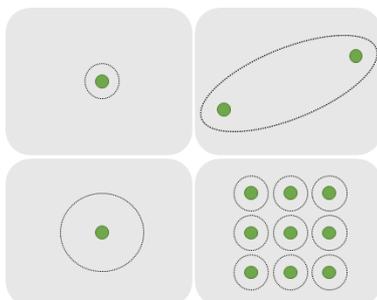


Fig. 4. Flight patterns

좁은 반경 안에서 회피하며 집결하여 비행하는 집결 비행, 두 경로점 사이를 타원 형태로 왕복하는 경로점 비행, 단일 경로점을 전체 군집이 뭉쳐서 선회하는 선회 비행, 개별로 주어지는 임무지점을 선회하는 개별 비행 등이다.

2.1.2 체계모드

군집무인기시스템의 운용을 위한 체계 모드를 정의하였다(Fig. 5). 체계 모드를 정의할 때 고려할 점은 최종 완성된 시스템의 운용 절차뿐만 아니라 개발 및 시험 단계에서 필요한 모드들을 식별하고 정의해야 한다는 점이다. 군집무인기시스템의 체계 모드는 비행 모드와 준비 모드로 구성되고, 비행 모드는 이륙부터 착륙까지의 일련의 과정을 기능과 목적에 따라 구분하여 하위 모드로 이륙, 자동, 반자동, 군집, 대기, 착륙, 비상귀환으로 정의하였다.

반자동 모드는 개별 기체 제작 단계에서 고도 및 속도 제어 기능을 점검하기 위한 모드로써 별도의 지상장비로 운용되고, 군집비행에서는 사용하지 않는 모드이다. 준비모드는 하위모드로써 지상점검 모드를 두었으며, 지상에서 비행전 점검 단계에서 조종면과 추진장치의 작동을 확인하기 위해 개투프로 동작 명령을 인가하는 모드이다. 수동 모드는 개별 기체의 개발 및 검증 단계에서 R/C 조종기를 이용하여 조종사가 비상 상황에서 대처하기 위한 모드이다.

2.1.3 정보교환

무인기 간 직접적으로 송수신하는 메시지는 무인기와 지상통제장비 간의 통제명령-상태 정보와는 다른 정의가 필요하다. 본 연구에서는 지상통제장비가 무인기에 전송하는 통제정보 TC(Tele-command), 무인기가 상태정보를 지상통제장비로 전송하는 TM(Telemetry)에 더하여 군집제어를 위해 무인기 간 상호 교환되는 무인기 상태정보를 TS(Tele-sharing)라

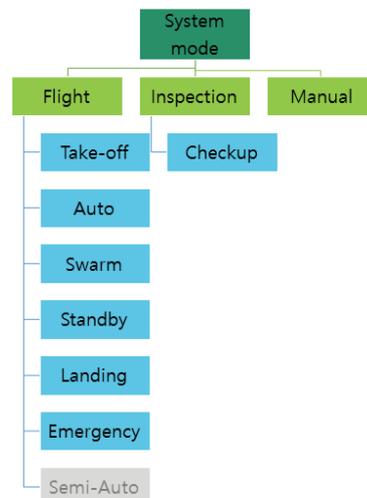


Fig. 5. System mode

고 정의한다. 메시지 정의에 따라 통신 알고리즘 요구도가 도출되므로, 군집 운용에 필요한 필수적인 정보를 최소한으로 유통하기 위해 각 메시지에 따라 전송 내용과 주기를 정의하였다. TC는 비행정보 설정, 비행모드 명령, 군집 비행 명령 등이 운용 과정에 비주기의 일회성으로 전송되며, 상황에 따라 개별(1:1) 또는 전체 무인기(1:N)에 메시지를 전송해야 한다. TM은 각 무인기의 상태를 지상에서 운용자가 모니터링하기 위한 목적으로 운용자의 개입에 영향을 주지 않을 정도의 실시간성이 요구된다. 이에 무인기는 지상통제장비로 저주기의 상태 메시지를 1:1 전송하도록 한다. TS는 무인기 간의 상태 정보를 교환하기 위한 목적으로 무인기에서 타 무인기로 1:N 전송되어야 하며, 근접 비행과 충돌회피를 위해 실시간성의 높은 주기로 유통되어야 한다. 상태정보의 사용과 실시간성 확보를 위하여 TM과 TS에는 주요 정보의 생성 시간을 포함된다.

2.2 분산형 군집제어

군집 무인체의 제어를 위한 관련 기술은 매우 다양하다. 가장 효율적인 방법은 서버나 주 이동체를 활용하는 중앙집중형인데, 이와 같은 방식은 민간 분야에서 이미 많은 발전을 이루었다. 그러나 군사적 활용을 고려했을 때 적진에서는 아군 기반시설을 활용하기 힘들 수 있고, 적의 공격에 의해 기반시설이 파괴될 수도 있다. 또한 여러 가지 예상하지 못한 상황에 스스로 유연하게 대처해야 하고 운용대수의 확장성도 있어야 하므로 분산형 방식에 대한 기술이 필요하다. 그러나 이 방식은 비용과 같은 효율성 문제로 민간 시장에서는 크게 투자가 이루어지고 있지 않다. 미래 전장에서 군집무인체계를 활용하기 위해서는 중앙집중형 방식과 분산형 방식이 모두 필요할 것으로 예측되므로 이 연구에서는 민간에서 투자가 잘 이루어지지 않고 있는 분산형 방식에 대해서 연구하는 것을 목표로 하였다.

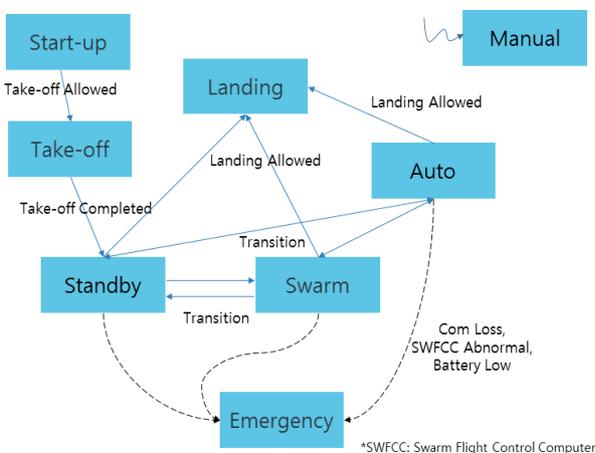


Fig. 6. Flight mode transition diagram

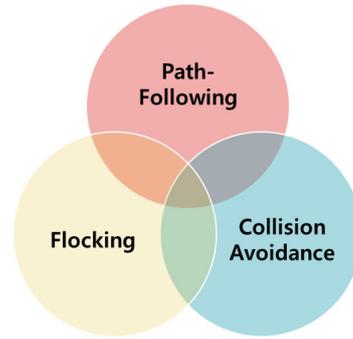


Fig. 7. Maneuvers for swarming missions and tasks

무인기를 군집으로 운용할 수 있는 여러 가지 상황에 대해서 고민해보면, 대부분 소모성 또는 소형무인기를 활용한 전술과 관련이 있다는 것을 알 수 있다. 성능이 좋은 고성능, 대형 무인기의 경우에는 소수의 무인기를 넓은 지역에서 동시 통제하는 개념이지, 좁은 공간에서 서로 협동시키는 운용개념이 적용되기는 쉽지 않다. 따라서 저렴한 시스템에서 구동될 수 있는 군집 비행제어법칙을 설계하는 것을 목표로 하였다.

군집비행을 위한 기동은 여러 무인기가 한정된 공역 내에서 함께 비행하는 것을 모두 포함한다. 따라서 기존의 무인기들처럼 넓은 공역에서 각자 떨어진 위치에서 비행하는 것은 기본이고, 서로 근접했을 때 충돌을 회피하는 것과, 같은 작업을 부여받았을 때 몰려다니며 비행하는 것도 필요하다. 기동들에 대한 특성을 분류하면 Fig. 7과 같이 경로 추종(path-following), 떼비행(flocking), 충돌 회피(collusion avoidance) 기동으로 구분할 수 있다.

군집무인체계 운용을 위한 비행제어법칙 설계에 있어 요구되는 주요 특성은 유연성(flexibility), 확장성(scalability), 강건성(robustness)이다.

앞서 서술한 경로 추종 기동을 위해서는 한 곳에 모이는 기동, 경로를 추종하는 기동, 각자 위치로 가는 기동 구현이 가능한 유도법칙 설계가 요구된다. 또한, 떼비행과 같이 함께 몰려다니는 기동을 구현하기 위한 유도법칙, 상호간 충돌하지 않기 위한 유도법칙 설계가 필요하다.

본 논문에서 서술한 군집 무인기 시스템은 상기 특성 및 기동 구현이 가능한 군집 제어 알고리즘을 탑재하였다. 해당 군집 제어 알고리즘은 경로 추종을 위한 벡터필드(vector field), 떼비행 구현을 위한 증강 쿠커-스메일 모델(Augmented Cucker-Smale model), 그리고 충돌 회피를 위한 포텐셜 필드(potential field) 기반으로 통합 유도법칙을 Fig. 8과 같이 설계하였다 [3-6]. 상기 기법들은 적은 연산량으로 소형 무인기 탑재에 유리하며, 분산형 방식으로 구현 가능한 장점을 지닌다. 통합 유도법칙에 대한 세부적인 내용은 참고 문헌 [6]에 기술하였다.

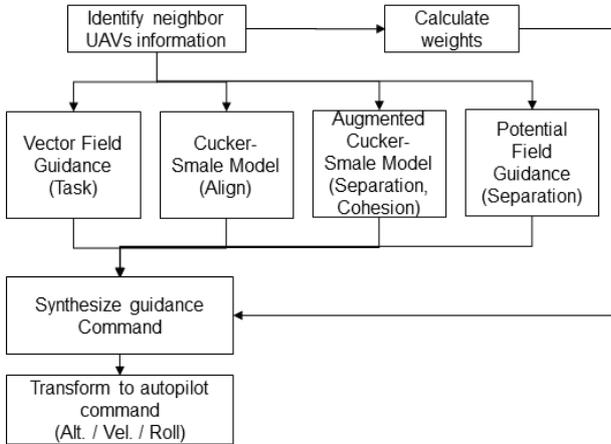


Fig. 8. Architecture of Decentralized Guidance Algorithm for Swarm Flight [6]

2.3 분산형 군집통신

일반적으로 규모 확장을 고려하는 환경에서 임의의 source와 destination의 연결을 보장하고 QoS (Quality-of-Service) 요구사항이 다른 다종의 트래픽을 유통하기 위한 분산구조 통신 설계는 쉽지 않은 일이다[7,8].

지금까지 모바일 애드혹 통신(MANET, Mobile Ad-hoc NETwork)에 대한 많은 연구가 있었으나 이론적인 분석과 실제 구현, 두 가지 측면에서 규모 확장 시에 MANET의 성능적 한계가 제시되어왔다. 본 연구에서는 애드혹 환경은 고려하되 보편적인 연결성을 지원하는 대신 소형 고정익 무인기의 군집비행 지원을 위해 구체화된 트래픽을 전송하기 위한 통신을 설계하고 그 성능을 확인하였다(Table 1).

효율적인 군집비행제어를 위해 3종의 데이터는 다음과 같은 특징을 갖고 전송된다. (i) 모든 트래픽은 브로드캐스팅 방식으로 전송된다. 군집비행을 위해 고속의 위치정보 갱신이 요구되고 이를 충족시키기 위해 저지연 전송이 요구된다. 이를 위해 우리는 안정적 전송을 일부 포기하고, 즉, 전송계층(Transport layer)의 재전송과 MAC(Medium Access Control) 계층의 RTS(Request To Send)/CTS(Clear To Send) 적

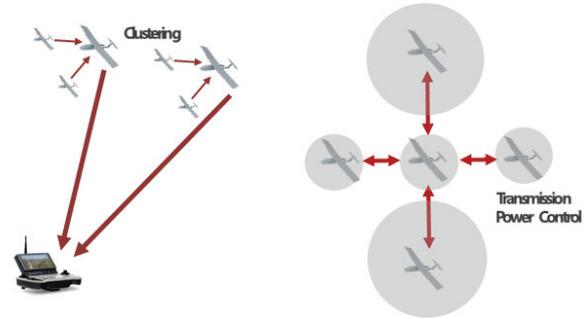


Fig. 9. Swarm network transmission technologies: TM clustering and transmission power control

용이 가능한 유니캐스트(unicast), 멀티캐스트(multicast) 방식 대신 낮은 지연을 가질 수 있는 브로드캐스트 방식을 적용한다. (ii) 전체 군집으로의 TC 전송을 보장하기 위해 TC를 수신한 노드는 일정 기간 동안 TS에 TC정보를 포함하여 이웃들에게 전송한다. (iii) TM은 클러스터링 방식으로 전송된다. TS와는 다르게 TC와 TM의 유통은 GCS와 군집드론 간에 이루어지므로 기본적으로 광역 간섭을 유발한다. 또한 CSMA(Carrier Sensing Multiple Access) 기반 MAC에서 TS 전송과의 비대칭적 carrier sensing으로 인해 TC, TM은 TS의 성공적 전송을 방해하는 요인이 된다. 주목할 점은 TC는 비주기적 이벤트성 메시지로 통상 망에 미치는 간섭이 미약하지만 TM은 상태정보 특성에 따라 트래픽의 전송빈도수 및 크기가 큰 경우 전체 망을 마비시킬 정도로 큰 영향을 미친다. 따라서 우리는 TM의 광역 간섭을 제어할 필요가 있으며 이를 위해 부가적인 정보 생산 없는 즉, 노드 간의 동의가 없는 클러스터링 전송기법을 고려한다(Fig. 9). 목표는 TC, TM의 정보 누락이 없으면서 광역간섭을 최소화하기 위한 최적의 클러스터 헤드(cluster head)를 선정하는 것이다. 이를 통해 TM유통을 위해 사용되는 통신용량을 절약하여 추가로 확보한 통신용량으로 노드 확장 및 TS의 전송빈도수 증가를 지원할 수 있다. (iv) 고속 갱신되는 TS의 안정적 전송을 위해 전역(global) 정보를 담고 있는 TM을 활용하여 TS의 전송빈도수와 전송범위를 계산한다. Fig. 10과 11은

Table 1. Swarm network data traffic

	Contents	Direction	Size (Bytes)	Freq.	Traffic (kbps)
TC	mission, command	GCS→UAV (1:N)	279	Event	10.3
TM	vehicle status	UAV→GCS (N:1)	45	Variable	137.6
TS	vehicle status (inter-vehicle)	UAV→UAV (1:N)	58	≥ 10Hz	784

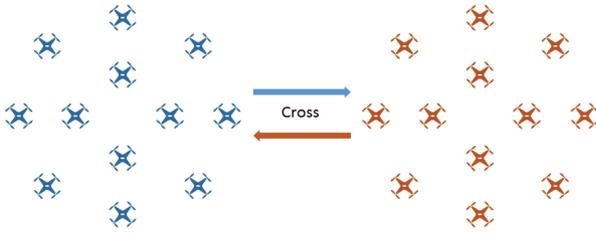


Fig. 10. Network Simulation Scenario

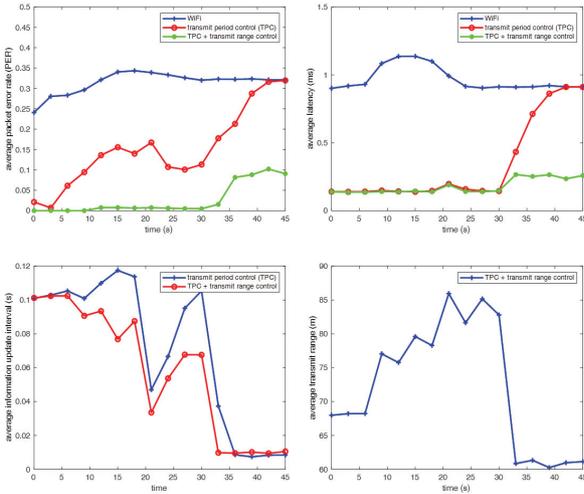


Fig. 11. Swarm Network Simulation

30대 군집비행 시나리오와 이때 군집통신의 세부 동작에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 시뮬레이션 시나리오는 2개의 swarm group이 약 2km 떨어진 위치에서 서로 마주보며 교차 이동하는 비행을 고려한다. 이는 Fig. 7의 군집비행 특성들을 하나의 시나리오 안에 반영한 것으로 이를 통해 다양한 군집비행 환경에서 군집통신이 정상 동작함을 검증하였다. 시뮬레이션은 송신출력제어와 전송빈도수제어의 적용 여부에 따라 패킷 전송 오류율(Packet Error Rate)과 전송지연(Latency) 결과를 보여주며, 제안 기법이 적용되지 않았을 때는 30% 수준의 PER과 1ms의 전송지연을 가지며, 제안기법 적용 시 시나리오 전반에서 전송오류가 발생하지 않으며 전송지연 또한 0.2ms 이하로 성능 개선이 있음을 확인하였다. 이는 군집비행제어를 지원하기에 충분한 결과이다.

2.4 고정익기 형상

유사목적 비행체 형상분석을 통해 본 과제에 적용할 비행체는 신속발진을 위해 전기모터에 의한 추진 방식을 적용하고, 비행체 전방영상을 위한 전면 카메라 장착을 위해 푸셔형 프로펠러를 채택하였다. 좁은 공간에 보관하기 위해 작은 단면의 동체, 얇은 익형, 접이형 날개와 접이용 프로펠러를 적용하였으며, 향후 캐니스터에 수납될 수 있는 형상을 고려하였다. 다량 제작을 위해 가능한 단순 형태로 설계하며, 특

히 국내에서 군집 비행시험을 수행하기 위한 시험장을 확보하는 것이 매우 어려운 상황을 고려하여, 저속 및 경량의 비행체를 설계하는 것을 매우 중요한 설계 개념으로 중점 고려하였다. 수평 및 수직꼬리날개로 구성되는 일반적인 비행체 후방동체 설계와는 달리, 전개 날개의 작동성과 캐니스터 수납을 위해 가급적 최소화할 수 있는 단순한 형상의 비행체로 구성하였다. 요구조건을 만족하는 비행체의 중량, 날개면적 및 모터출력을 결정하기 위해, 이륙, 순항, 임무, 순항 및 착륙에 의한 임무 프로파일에 의해 사이징을 수행하였다. 임무 단계별 성능 관계식으로부터 중량, 날개면적 및 모터출력을 예측하였고, 초기 사이징 결과의 타당성을 유사비행체 분석을 통해 Fig. 12와 같이 “동력/중량 비” - “중량/날개면적 비” 차트에서 확인하였다. 1호기부터 5호기까지 설계된 기체의 형상을 다음의 Table 2에 정리하였다.

기체 최종 형상은 외형이 5호기와 동일하며 무게 중심이 주익 뒷전부터 전방 28 mm에 위치한다. 주익의 붙임각 2.5도이며, 추진 모터 위치는 동체의 후방으로 확정되고, 모터가 장착되는 동체 후면의 면적을 축소함으로써 기체의 항력 감소를 꾀하였다. 제작 단순화를 위해 주익과 미익의 좌/우 날개의 접합부

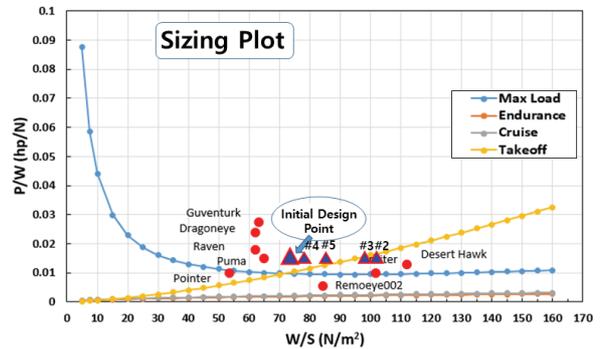


Fig. 12. Analysis of Fixed-Wing UAV size

Table 2. Comparison of Prototype UAVs

	#1	#2	#3	#4	#5	
Configuration	Conventional (V-tail)	Tandem (V-tail)	Tandem (horizontal/vertical)	←	←	
Wing Span (main/tail) [m]	2.2 / 0.6	1.6 / 1.0	←	1.8 / 1.6	1.8 / 1.2	
Cord [m] (main/tail)	0.18 / 0.11	0.12 / 0.11	←	←	←	
Main Wing	Area [m ²]	0.4	0.192	0.192	0.216	←
	Aspect ratio	12.2	13.3	13.3	15	←
Airfoil (main/tail)	SD7032 / NACA0009	E214 / E193	E214 / E214	←	←	
Control Surface	Aileron / Elevator	Elevon	Elevon	←	←	
	Initial design	deploying wing	deploying wing	deploying wing (configuration optimized)		

* fuselage length 1m

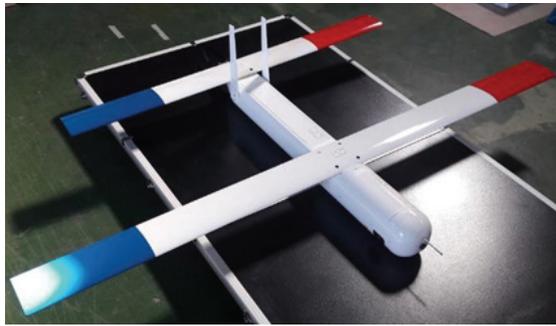


Fig. 13. Final fixed-wing swarm UAV

단차는 제거하였다. 비행시험을 통해 확인한 최저속도는 약 15m/s 이하이다. Fig. 13은 최종 제작된 형상을 보여준다.

2.5 탑재장비

탑재장비는 비행제어부, 항법 및 대기속도 센서와 녹화용 카메라, 군집통신장비로 구성된다. 비행제어부는 단일 프로세서를 장착한 2개의 컴퓨터 보드로 구성된다. 이착륙과 자동모드 비행을 관장하는 비행제어컴퓨터(FCS)와 군집 알고리즘 연산을 구동하는 군집제어컴퓨터(SWFCC)로 이루어진다. 대기모드나 군집모드가 인가되면 군집 제어 명령을 SWFCC에서 연산하여 FCS에 전달한다. FCS와 SWFCC 간 메시지 교환은 Fig. 14와 같다. 군집통신 장비를 포함한 탑재장비의 형상과 배치를 Fig. 15에서 확인할 수 있다.

2.6 지상통제장비

지상통제장비는 다수의 무인기를 지상 운용자 1인이 동시에 통제하고 모니터링할 수 있도록 설계되었다(Fig. 16). 2개의 화면을 구성하여 좌측은 전체 무인기를 동시에 통제하는 명령 버튼과 주요 상태 정보를 시각적으로 도시하고, 2차원 지도 기반 화면에 현재 임무 정보와 무인기들의 움직임을 도시한다. 우측은 임무 설정과 장입, 개별 무인기의 상태정보 도

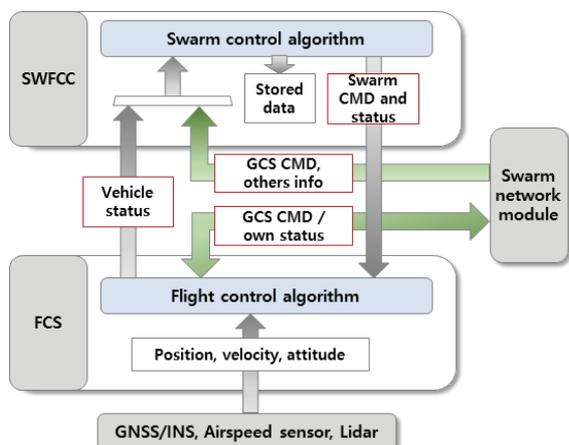


Fig. 14. Messages between FCS and SWFCC

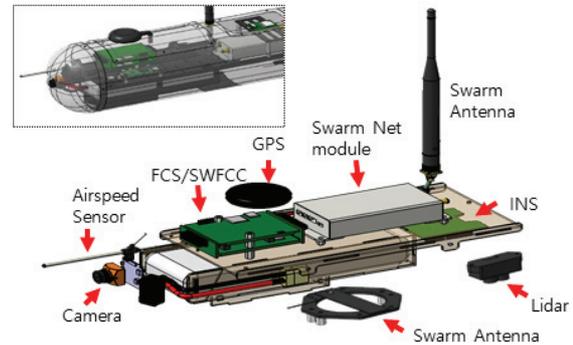


Fig. 15. Swarm network and on-board system



Fig. 16. Ground control system

시와 통제 기능, 지상통제장비 명령 로그 화면 등으로 구성된다. Figs. 17, 18은 지상통제장비의 사용자 인터페이스를 보여주고 있다.

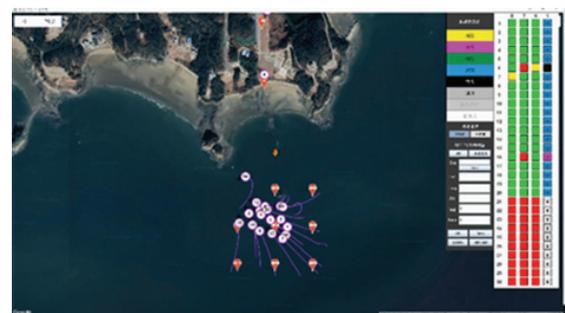


Fig. 17. Ground control display (left)

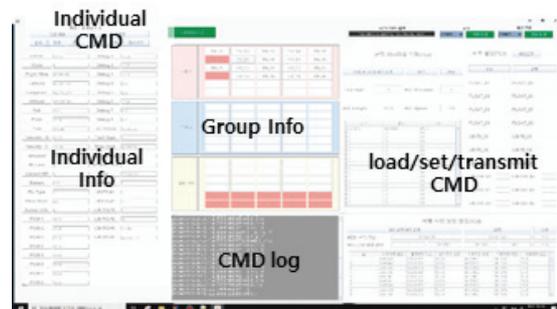


Fig. 18. Ground control display (right)



Fig. 19. Launching UAV

2.7 발사장비

발사장비는 무인기를 정지 상태에서 이륙시키는 장비로 번지코드를 당겨 기준 속도 이상으로 가속하는 방식이 채택되었다. 설계 기준 값은 비행체의 모터 추력을 제외하였을 때 3.5kg 기체를 정지 상태에서 10m/s 이상으로 가속하는 것을 목표로 하였다. 실 장비 운용 시 비행체에 이륙이 인가되면 최대 쓰로틀로 모터가 구동되며 이때 추력에 의해서 기체가 밀리지 않도록 동체 지지부가 설계되었다. Fig. 19는 발사장비에서 무인기가 발사되는 장면을 보여주고 있다.

2.8 통합 시뮬레이터

중대형의 군용 무인항공체계의 개발 과정에서는 소프트웨어와 장비의 통합 과정에서 단계별로 검증을 거치는 데 반해 구성품 수가 적고 복잡도가 높지 않은 소형 무인기 시스템의 경우에는 비행시험 이전 단계에서 동일한 검증 절차를 거치는 데 현실적인 제약이 따른다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 개념으로 시스템을 검증하였다. 단일 비행체를 제어하는 비행제어 알고리즘의 제어이득은 검증 기간에 R/C 조종 기능을 탑재하여 비행체의 R/C 비행을 통한 검증을 수행하였다. FCS, SWFCC 탑재 소프트웨어인 비행운용프로그램(Operational Flight Program, OFP)과 비행제어 알고리즘, 군집제어 알고리즘 간 연동과 탑재장비, 지상통제장비, 군집통신장비 간의 연동은 지상시험으로 확인하였다. 군집제어 알고리즘의 기능과 성능은 군집무인기 통합시뮬레이터를 구축하여 지상 모의시험으로 검증하였다[9].

군집무인기 통합시뮬레이터는 군집제어 알고리즘을 검증하고 비행을 모의하여 성능을 검증하기 위한 목적으로 개발되었다. 군집제어 알고리즘의 비행운용 프로그램과 동일한 소프트웨어를 탑재하고, 비행체 운동 모델, OFP/비행제어 알고리즘 모의모델, 군집통신모델과 지상통제 환경을 구성하였다(Fig. 20).

다수 비행체의 실시간 모의를 위하여 다수의 컴퓨터로 시뮬레이션 연동 표준인 HLA/RTI(High Level

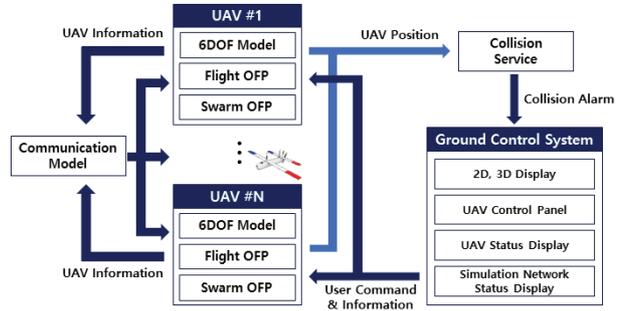


Fig. 20. The concept of swarm simulator

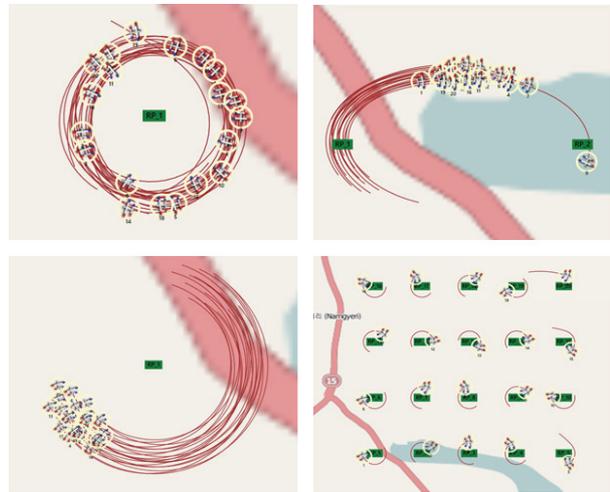


Fig. 21. Integrated swarm flight simulation

Architecture/Runtime Infrastructure)를 기반으로 하는 병렬 연산 시스템을 구축하였다[10].

Figure 4의 비행패턴을 시뮬레이터에서 모의한 결과 Fig. 21과 같이 20대의 무인기가 군집 비행을 정상적으로 수행함을 확인하였다.

2.9 비행시험

비행시험은 최종 20대의 비행을 목표로 비행 대수를 점진적으로 늘여가며 여러 차례의 군집비행을 수행하였으며, 이를 통해서 무인기 간, 무인기-지상체 간 정보교환이 안정적으로 이루어짐을 확인하였고, 그 결과 분산형 군집제어 알고리즘의 성능을 확인할 수 있었다[11].

주요 비행시험 결과로써 2020년 5월 7일에 20대의 군집 무인기로 비행시험을 시도하였으며, 이 중에서 19대가 이륙에 성공하여 군집으로 비행하였다. 군집 비행 중 무인기 1대는 위성항법 센서 이상이 발생하여 귀환시켰으며, 이로 인해 18대의 고정익기로 계획된 무리 비행을 수행하였다. 19대 또는 18대의 비행 경향성을 통하여 본 연구에서 목표로 한 20대 무인기의 군집 비행이 가능한 비행 제어 기술에 대해서는 충분히 검증되었다고 분석되었다.

Figure 22는 군집비행을 위해 비행체 지상 점검 및



Fig. 22. System Preparation



Fig. 23. Display of UAVs During individual flight

대기 중인 장면이며, Fig. 23은 무인기 19대가 이륙 후 개별 비행 중일 때 지상통제화면에 표시된 무인기 위치와 궤적이다. 궤적을 살펴보면 무인기간에 거리가 가까워지면 충돌하지 않기 위해 기동하였음이 나타난다. Fig. 24는 18대가 떼비행 하고 있을 때 가장 뒤에서 비행하는 무인기에서 촬영된 영상으로 떼비행이 잘 이루어지고 있음이 확인된다. Fig. 25는 해당 쏘티에서 이착륙 위치를 포함하여 모든 무인기의 전체 비행궤적을 보여주는 그림이다. 순차적으로 이륙 후 개별 비행-집합하여 선회비행-타원형으로 두 점을 왕복하는 경로점 비행-다시 개별비행 후 착륙의 순서로 진행되었다. 결집과 흩어짐, 무리 비행이 조합된 임무 비행을 통해 각 임무 비행 궤적이 시뮬레이터 환경에서 모의한 Fig. 21의 결과와 유사함을 확인



Fig. 24. Swarm flight test (on-board picture)

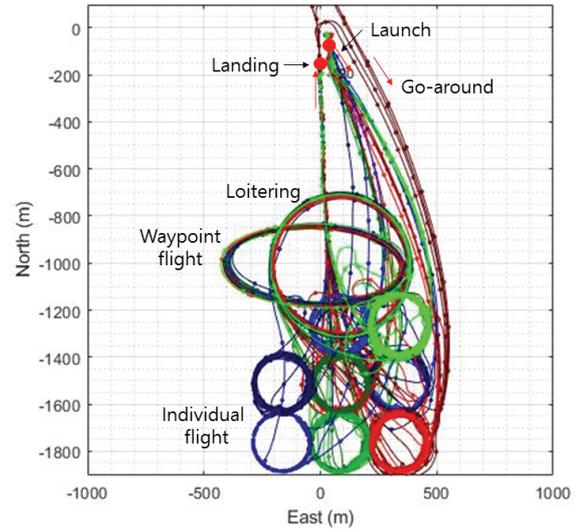


Fig. 25. Whole flight trajectories (2D)

할 수 있었다. Fig. 26과 27은 선회 비행에서 경로점 비행으로 전환하고, 마지막으로 다시 개별 비행으로 전환하는 3차원 비행 궤적과 그 과정에서 두 무인기 간 상대거리를 나타낸 그림이다. 모드가 전환되면서도 무인기 간 거리를 잘 유지하였고, 특히 마지막에 개별 비행으로 전환될 때에도 무인기 간 거리를 잘 벌리면서 각각의 목표한 위치로 향하는 것을 확인하였다.

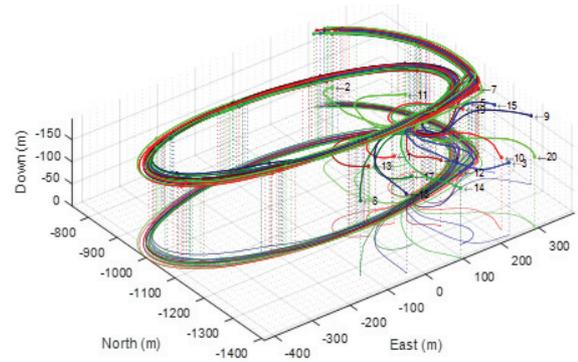


Fig. 26. Flight trajectories during pattern changes (3D) [6]

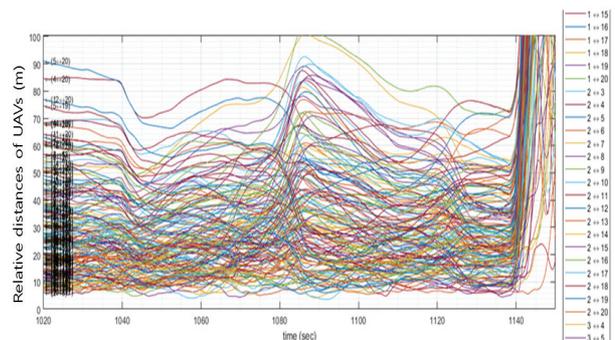


Fig. 27. Relative distances of UAVs [6]

III. 결 론

비행시험 대수를 점증적으로 늘려가는 군집 비행 시험을 통하여 충돌회피 기능 확인과 비행 패턴 별 비행궤적 분석, 비행패턴 전환 시에 비행 거동 확인 등을 수행하였다. 비행시험과 시뮬레이션 환경에서 모의 결과를 비교했을 때 예측된 형상으로 비행함을 확인하였다. 최종 비행시험에서 19대가 군집비행을 성공하여 군집통신과 군집제어 알고리즘을 성공적으로 검증함으로써 군집무인체계를 위한 1단계 연구를 성공적으로 종료하였다.

군집무인체계와 관련한 향후 연구는 군집제어 기술과 군집통신 기술뿐만 아니라 군집 내에서 획득한 개별 정보를 융합하여 임무에 활용하는 군집정보 기술과 변화하는 운용환경에 적응하며 협력적으로 작업을 수행하여 주어진 임무를 완수하도록 하는 군집 협업 기술에 대한 연구가 반드시 필요하다.

상기 기술들을 통합한 군집무인체계의 지능화는 다양한 플랫폼에 적용이 가능한 개념이지만, 전장에서 운용개념과 요구도에 따라 실제 구현될 무기체계의 주요 성능이 결정되고 이를 바탕으로 요구되는 군집무인체계의 군집지능도 달라질 수 있다. 따라서 전장환경에서 군집무인체계에 어떠한 역할을 부여할 것인지 구체화됨과 함께 관련 연구개발이 가속화될 수 있을 것이다.

References

- 1) Kim, K. and Kim J., "Development Direction and Trend of Swarm Drones Leading Future Warfare," *Current Contents for Defense Science & Technology Information*, Vol. 497, No. 1, 2019, pp. 98~109.
- 2) Myung, H. and Lim, H., "Research and Development Trend for Swarm Unmanned Aerial Vehicles," *Defense Science & Technology Plus*, Vol. 2020, Special Issue, pp. 420~425.
- 3) Lim, S., Jung, J., Oh, S., Song, Y. and Oh, H., "A Study on Decentralized Control Algorithm for Swarm Flight of Small UAS(II)," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*

Spring Conference, April 2019, pp. 368~369.

- 4) Lim, S., Song, Y., Choi, J., Myung, H., Lim, H. and Oh, H., "Decentralized Hybrid Flocking Guidance for a Swarm of Small UAVs," *The 2019 International Workshop on Research, Education and Development on Unmanned Aerial Systems(RED-UAS 2019)*, November 2019, pp. 287~296.

- 5) Lim, S., Myung, H., Lee, H., Lee, K. and Lim, H., "A Study on Decentralized Control Algorithm for Swarm Flight of Small UAS," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2018, pp. 437~438.

- 6) Jeong, J., Myung, H., Kim, D. and Lim, H., "Design of Decentralized Guidance Algorithm for Swarm Flight of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 12, 2021, pp. 981~988.

- 7) Seo, S., Lee, J., Joo, J., Ahn, J., Lee, H. and Kim, J., "A Study on the wireless network for the swarming flight of small UAVs," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2018, pp. 439~440.

- 8) Seo, S. and Lee, J., "Communication Network Development Trend for Swarm Unmanned Aerial Vehicles Control," *Defense Science & Technology Plus*, Vol. 2020, Special Issue, pp. 222~226.

- 9) Oh, S., Lee, H., Lim, S., Myung, H. and Lim, H., "Development of a Simulator for Validation of Decentralized Swarm Flight Control Algorithm," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, November 2019, pp. 552~553.

- 10) Kim, J., "HLA/RTI based on the Simulation Composition Technology," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, 2016, pp. 244~251.

- 11) Myung, H., Lim, S., Jeoung, J., Lee, H., Kim, D., Lim, H. and Joo, J., "Swarm Flight Tests of Small Fixed-Wing UAVs," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, April 2020, pp. 557~558.