



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 49(12), 981-988(2021)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.12.981>

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

## 고정의 소형무인기 군집비행을 위한 분산형 유도 알고리즘 설계

정준호<sup>1</sup>, 명현삼<sup>2</sup>, 김도완<sup>1</sup>, 임홍식<sup>3</sup>

### Design of Decentralized Guidance Algorithm for Swarm Flight of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles

Junho Jeong<sup>1</sup>, Hyunsam Myung<sup>2</sup>, Dowan Kim<sup>1</sup> and Heungsik Lim<sup>3</sup>

Agency for Defense Development

#### ABSTRACT

This paper presents a decentralized guidance algorithm for swarm flight of fixed-wing UAVs (Unmanned Aerial Vehicles). Considering swarm flight missions, we assume four representative swarm tasks: gathering, loitering, waypoint/path following, and individual task. Those tasks require several distinct maneuvers such as path following, flocking, and collision avoidance. In order to deal with the required maneuvers, this paper proposes an integrated guidance algorithm based on vector field, augmented Cucker-Smale model, and potential field methods. Integrated guidance command is synthesized with heuristic weights designed for each guidance method. The proposed algorithm is verified through flight tests using up to 19 small fixed-wing UAVs.

#### 초 록

본 논문에서는 다수 고정익 소형무인기 군집비행을 위한 분산형 유도 알고리즘 설계를 다룬다. 군집비행을 통한 임무 수행을 위해서 각 무인기들은 집결, 선회, 경로점, 개별 비행 등의 기동이 필요하다. 이를 위해서는 경로 추종, 때비행, 충돌 회피가 요구된다. 본 논문에서는 상기 기동들을 수행하기 위해 벡터필드(경로 추종), 증강 쿠커-스메일 모델(때비행), 포텐셜 필드(충돌 회피) 기법들을 활용한 통합 유도 알고리즘을 제안한다. 통합 유도 명령 생성을 위해 각 기법에서 생성된 유도 명령을 가중치에 따라 혼합할 수 있게 설계하며, 19대의 소형 고정익 무인기를 이용한 비행시험을 통해 제안한 군집 유도 알고리즘의 성능을 확인하였다.

**Key Words** : Swarm(군집), Swarm Flight(군집 비행), Decentralized Guidance(분산형 유도), Flight Test(비행시험)

#### 1. 서 론

일반적으로 드론이라는 이름으로 널리 알려진 무인기의 대중화에 따라, 국내외 다양한 형상의 무인기들이 개발되어왔다. 이와 함께, 무인기 탑재를 위한 소형 센서 및 하드웨어 기술도 발전을 이루어왔으며,

저비용으로 효율적인 비행이 가능한 무인기들이 등장하고 있다[1]. 탑재 임무 장비의 소형화에 대한 개발도 동시에 이루어지고 있으며, 이를 기반으로 다양한 응용분야에서 소형 무인기의 활용도가 높아지고 있다. 특히 쉽게 공중 촬영이 가능한 점을 이용해 일 상 사진/동영상 촬영은 물론, 정찰 및 감시 임무에

† Received : October 7, 2021 Revised : - Accepted : November 25, 2021

<sup>1,2</sup> Senior Researcher, <sup>3</sup> Principal Researcher

<sup>2</sup> Corresponding author, E-mail : hsmyoung@add.re.kr

© 2021 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

활용되고 있다. 또한, 택배/커피 배달 등 삶과 밀접한 분야에 무인기를 이용한 생태계가 구성되고 있다.

단일 무인기 임무뿐 아니라 다수 소형 무인기 운용을 통한 운용 방안이 군/민간 분야를 막론하고 다양하게 나타나고 있다. 2018년 평창 동계올림픽 개막식에서 Intel 社의 멀티콥터 형 무인기 ‘슈팅 스타’ 1,218대를 이용한 드론쇼는 군집 비행을 엔터테인먼트 분야에 적용한 대표적 사례로 볼 수 있으며, 최근 국내 파블로 항공 社에서 신개념 멀티콥터 형 무인기를 이용한 불꽃드론쇼를 선보이기도 했다. 군집 비행을 통해 획득한 영상 정보를 이용한 난민 감시 및 수색 시스템에 대한 연구가 그리스에서 진행되었다. 또한, 근접 촬영을 통해 토양 및 작물 모니터링이 가능하다는 점을 이용한 정밀 농업 분야에도 군집 무인기 기술이 활용되고 있다. 군사적 목적의 활용 방안으로도 다양한 연구가 진행되고 있다. 미국에서는 저비용 무인기 군집 기술 LOCUST(LOW-Cost UAV Swarming Technology) 프로그램의 일환으로 감시/정찰, 공격 등의 임무 수행이 가능한 Coyote 개발 사례가 있으며, 군집 무인기의 공중 전개/회수가 가능한 Gremlins 프로그램이 진행되고 있다. 중국은 군집 무인기를 이용한 공격 체계에 대한 연구를 수행하고 있으며, CETC(China Electronics Technology Group Corp)는 119대의 군집 비행을 선보인 사례가 있다. 이외 스웨덴, 러시아 등 다양한 국가에서 군사적 목적의 군집 무인기를 위한 연구를 수행하고 있다. 대한민국 육군은 ‘드론봇 전투체계 비전 2030’을 통해 모체 무인기에서 소형 군집 무인기 이륙/회수 가능한 시스템에 대한 개념을 소개하고 있다[2-5].

다수 무인기를 이용한 임무 달성을 위해서는 군집 지능(swarm intelligence)의 구현이 요구된다. 군집 지능은 군집 제어(swarm control), 군집 통신(swarm network), 군집 정보(swarm information), 군집 협업(swarm collaboration) 4가지 핵심 기술이 유기적으로 통합될 때 구현될 수 있다. 본 논문은 고정익 소형무인기의 군집 비행을 위한 4가지 핵심 기술 요소 중 군집 제어에 대한 부분을 다룬다. 군집 제어는 군집을 이룬 객체들이 목표점을 위해 기동할 수 있는 경로 추종(path following)이 기본이 되어야 한다. 객체간 또는 장애물과의 충돌 회피(collusion avoidance)가 가능하며, 군집체의 이동을 위한 떼비행(flocking)이 필요하다.

이를 위해 분산형 군집 유도 알고리즘에 대한 설계를 소개한다. 군집 비행을 통한 임무수행을 위해 각 무인기들은 경로 추종, 떼비행, 충돌 회피 알고리즘이 요구된다. 이를 위해 벡터 필드(vector field) 기반 경로 추종, 증강 쿠커-스메일 모델(augmented Cucker-Smale model) 기반 떼비행, 포텐셜 필드(potential field)를 이용한 충돌 회피 기법을 활용한 통합 유도법칙을 제시한다. 19대 소형 고정익 무인기

의 군집 비행을 통해 제안한 분산형 군집 유도 알고리즘의 성능을 확인하였으며, 군집 무인기 시스템 운용 시 적용 가능성을 확인하였다.

## II. 본 론

### 2.1 문제 정의

무인기를 군집으로 운용하여 임무를 달성하고자 하는 여러 가지 상황에서 많은 경우 소모성을 가정하고 소형무인기를 활용한 전술이 논의되고 있다. 이를 위해서는 소형/저비용 시스템에서 구현 가능한 군집 유도 알고리즘 설계가 필요하다. 군집 비행을 통한 임무 수행에 있어 시스템과 알고리즘에 요구되는 특성은 다음과 같다. 임무 수행 시 요구되는 기동에 범용적 적용이 가능한 유연성(flexibility), 객체 증가에 대응할 수 있는 확장성(scalability), 단일 객체의 통신두절/임무 이탈 등에도 군집 임무 수행이 가능한 강건성(robustness)으로 식별된다. 또한, 군집비행은 여러 무인기가 공통된 공역 내에서 함께 비행하는 것을 의미한다. 이를 위해서는 무인기들이 각자 독립된 공간에서 비행하는 것을 기본으로, 각 무인기들이 근접 시 충돌 회피 기동이 요구된다. 또한, 같은 임무나 작업이 할당되면 몰려다니는 비행도 가능하여야 한다.

무인기들이 군집으로 운용되기 위해서 수행해야 하는 가장 기본적인 작업(task)들은 여러 무인기가 ①한 곳에 집결하는 일(집결, gathering), ②한 지점을 중심으로 무리로 제공하는 일(선회, loitering), ③임무에 맞는 경로를 그리며 무리로 비행하는 일(경로 점/경로 추종, waypoint/path following), ④각자 맡은 곳에서 제공하는 일(개별 작업, individual task)로 구분할 수 있다. 위와 같이 정의된 작업들을 수행하기 위해서 무인기들에게 필요한 기동은 ①경로 추종, ②떼비행, ③충돌 회피가 요구된다. 군집 비행을 위해 무인기들이 수행해야 하는 기본적 작업과 이에 적합한 기동은 Table 1과 같이 정리된다.

Table 1. Required Flight Maneuvers with respect to Swarm Tasks

Maneuver \ Task	Path Following	Flocking	Collision Avoidance
Gathering	-	○	○
Loitering	○	○	○
Waypoint	○	○	○
Individual Task	○	-	○

## 2.2 분산형 군집 유도법칙

본 논문에서 정의한 4가지 작업 수행을 위해서 요구되는 경로 추종, 때비행, 충돌 회피 기동 구현을 위하여 Fig. 1과 같은 통합 유도법칙을 설계한다. 통합 유도법칙은 벡터 필드, 증강 쿡커-스메일 모델, 포텐셜 필드 기법을 통해 구성하며, 증강 쿡커-스메일 모델 기반 유도법칙은 정렬을 위한 모델과 응집/분리를 위한 증강 모델을 포함한 구조를 적용한다[6-8].

통합 유도법칙에서는 Identify neighbor UAVs information 블록을 통해 각 객체에게 적합한 유도법칙 명령을 생성할 수 있는 전처리 과정이 선행된다. 해당 블록에서는 수신된 정보를 분류하기 위하여 각 객체들을 이웃(neighbor), 행인(passerby), 실재(esse), 환영(ghost), 그림자(shadow)로 정의한다. 이웃은 나와 같은 작업을 할당받고 같은 무리로 비행하게 되는 객체를 의미하며, 행인은 서로 다른 작업을 할당받아 자기와는 다른 비행을 하게 될 객체를 의미한다. 어떤 객체가 이웃인지 행인인지는 운용자에 의해서 결정되며, 필요에 따라 무인기가 판단할 수도 있다. 실재와 환영은 다른 객체의 상태 정보를 기반으로, 해당 정보의 유의미함을 판단하는 개념이다. GNSS 등에 의해서 모두 동기화된 시간을 알고 있다고 할 때 내가 수신한 정보가 어떤 시점에서의 정보인지를 살펴보고, 의미 있는 시간 범위 내의 데이터라면 실재라고 판단하고, 그 데이터를 비행제어법칙에 활용한다. 그러나 데이터가 오래되어 이를 기반으로 현재 상태를 예측한다고 하더라도 그 신뢰도가 떨어진다 하면 환영으로 판단하고, 그 데이터를 비행제어법칙에 활용하지 않는다. 그림자는 데이터가 생성된 시점은 오래되었지만 그 데이터를 기반으로 현재 상태를 추정할 결과가 신뢰할 만한 데이터를 의미한다.

본 논문에서는 과거 데이터를 바탕으로 현 상황을 예측하는 부분을 포함하지 않기에 그림자 데이터는

생략토록 한다. 데이터가 발생된 시점의 시간을 기준으로 실재와 환영을 구분하며, 실재 데이터 중 상황에 따라 이웃과 행인을 다음과 같은 기준으로 식별한다. 집결 및 개별 비행의 경우 모든 객체가 서로 행인으로 분류된다. 동일한 지점으로 모이거나, 아니면 각자 맡은 다른 곳에 가서 비행하지만 서로 몰려다니는 때비행을 할 필요는 없기 때문에 벡터 필드 기반의 경로 추종 유도명령과 포텐셜 필드 기반의 충돌 방지 유도명령만을 사용한다. 경로점 또는 체공 비행의 경우에는 운용자가 설정해준 그룹 정보를 통해서 같은 그룹에 속한 무인기는 이웃으로 판단하고, 경로 추종 유도명령, 때비행 유도명령, 충돌 방지 유도명령을 모두 적용한다. 하지만 그룹이 다르게 지정된 객체라면 해당 무인기 정보는 때비행 유도명령에는 활용하지 않고, 충돌 방지 유도명령에만 활용한다. 상황에 따른 유도법칙은 다음과 같이 구분한다.

- ① 경로 추종을 위한 벡터필드 기반 유도법칙
- ② 때비행을 위한 증강 쿡커-스메일 모델 기반 유도법칙
- ③ 행인과의 충돌을 방지하기 위한 포텐셜 필드 유도법칙
- ④ 이웃과의 충돌을 방지하기 위한 포텐셜 필드 유도법칙

### 2.2.1 경로 추종 유도: 벡터필드 기법

본 논문에서는 경로 추종 유도를 위해 벡터 필드 기반 유도법칙을 선정한다. 벡터 필드 기법은 소수의 매개변수를 변경하는 것만으로도 벡터 필드의 형상 또는 패턴을 손쉽게 결정할 수 있는 장점이 있다. 전투기동 및 유도무기와 같이 복잡하거나 매우 정밀한 유도가 요구되는 기동에는 적합하지 않을 수 있으나 단순한 경로 및 패턴 추종 기동에는 충분한 성능을 보인다.

벡터 필드 기반 유도법칙을 위해 고려된 무인기 모델은 식 (1)과 같은 단순화 모델을 사용한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v_g \cos \chi \\ \dot{y} &= v_g \sin \chi \\ \dot{v}_g &= -(v_g - v_d) / \tau_v \\ \dot{\chi} &= -(\chi - \chi_d) / \tau_\chi \end{aligned} \quad (1)$$

위 식의  $v_g$ 와  $\chi$ 는 무인기의 지면 속도(ground speed)와 비행 방향(course angle)을 나타내며, 하첨자  $d$ 는 추종 요구값을 의미한다.  $\tau_v$ 와  $\tau_\chi$ 는 각 변수들의 시상수를 나타내며, 이를 기하학 관계로 도시하면 Fig. 2와 같다.

벡터필드 기법을 이용한  $i$ 번째 무인기의 경로 추종 유도법칙은 아래 식 (2)와 같이 설계된다.

$$\mathbf{u}_i^{VF} = \begin{bmatrix} v_{i,d} - v_{i,g} \\ v_{i,g}(\chi_{i,d} - \chi_i) \\ z_{i,d} - z_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

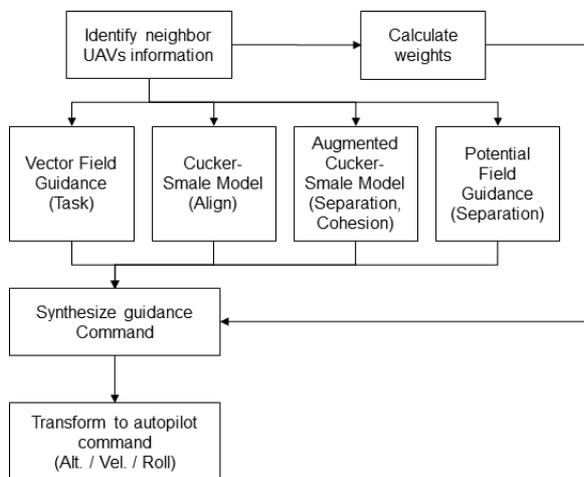


Fig. 1. Architecture of Decentralized Guidance Algorithm for Swarm Flight

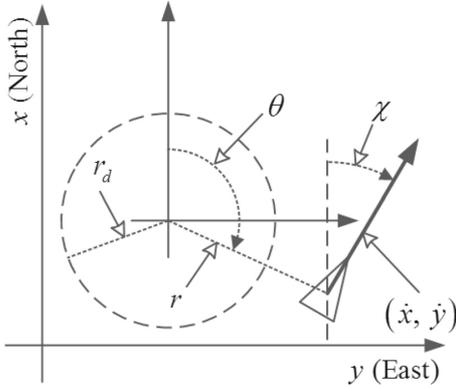


Fig. 2. Geometric Relations[9]

위 식에서  $z_{i,d}$  와  $z_i$  는 대상 무인기의 수직축 목표 위치와 현재 위치를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r\dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{v_g}{\sqrt{(r-r_d)^2 + p_d^2}} \begin{bmatrix} r_d - r \\ p_d r \end{bmatrix} \quad (3)$$

기본 비행을 위한 벡터 필드는  $VF_{cl}$ 로 설정하며 식 (3)과 같이 정의한다[9,10].  $p_d$ 는 형상을 결정하는 매개변수로 부호는 벡터의 회전 방향을, 크기는 벡터의 회전력 정도를 결정한다.  $r_d$ 는 원하는 선회 반경을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \chi_{cl} &= \theta + \text{atan2}(p_d r, -(r-r_d)) \\ \dot{\chi}_{cl} &= \frac{v_g p_d ((r-r_d)(r-2r_d) + p_d^2 r^2)}{((r-r_d)^2 + p_d^2 r^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (4)$$

상기 매개변수들을 이용해 각 위치별 벡터가 나타내는 경로각과 그 변화율은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.  $VF_{cl}$ 의 경우 반경이  $r_d$ 인 원에 부드럽게 접근하며 선회하는 벡터 필드를 생성 가능하다.

경로점 비행을 위한 벡터 필드  $VF_{el}$ 에 대한 설계는 다음과 같다. 본 논문에서는 경로점 비행을 두 점이 있을 때 그 두 점을 육상 트랙처럼 타원형 궤적을 그리며 비행하는 것으로 정의한다.

$$f(\mathbf{p}) \equiv \frac{-v_g}{r(r^2 + r_d^2)} \begin{bmatrix} x_r(r^2 - r_d^2) + y_r(2rr_d) \\ y_r(r^2 - r_d^2) - x_r(2rr_d) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{p} = (x_r, y_r)$ 은 그림 2에서 보이는 극좌표계의 원점이다. 만약 행렬  $C$ 가 정칙행렬(nonsingular matrix)이고  $\mathbf{p} = [x_r, y_r]^T$ 라면  $\mathbf{p}' = C^{-1}\mathbf{p}$  관계를 정의할 수 있다. 이때 함수  $f$ 는 아래와 같은 관계를 가진다.

$$f'(\mathbf{p}) = C \cdot f(C^{-1} \cdot \mathbf{p}) \quad (6)$$

타원의 기울어진 정도를  $\theta_{rot}$ , 장축을  $r_{maj}$ , 단축을

$r_{min}$ 이라고 하고,  $C$ 는 아래 식과 같이  $R$ 로 정의할 수 있다.

$$R \equiv \begin{bmatrix} \cos\theta_{rot} & \sin\theta_{rot} \\ -\sin\theta_{rot} & \cos\theta_{rot} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{maj} & 0 \\ 0 & r_{min} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$VF_{el}$  설계를 위해 식 (6)  $\mathbf{p} = [x_r, y_r]^T$ 을  $\mathbf{p}_{el} = [x_{el}, y_{el}]^T$ 로 대응하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{el} \\ \dot{y}_{el} \end{bmatrix} \equiv R \cdot f(R^{-1} \cdot \mathbf{p}_{el}) \quad (8)$$

따라서, 경로각 명령은 식 (9)와 같이 생성된다.

$$\begin{aligned} \chi_{el} &= \text{atan2}(\dot{y}_{el}, \dot{x}_{el}) \\ \dot{\chi}_{el} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.2.2 때비행 유도: 증강 쿠커-스메일 모델 기법

때비행 유도 시 사용된 증강 쿠커-스메일 모델은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{v}}_i \equiv \mathbf{u}_i^{ACS} = \mathbf{u}_i^{CS} + \mathbf{u}_i^{Aug} \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{v}_i = \dot{\mathbf{p}}_i$  각 무인기의 2차원 평면상 속도를 의미한다.  $\mathbf{u}_i^{CS}$ 는 순수 쿠커-스메일 모델로써 모든 객체의 속도를 정렬하는 역할을 하며,  $\mathbf{u}_i^{Aug}$ 는 증강 항으로써 스프링처럼 멀면 당기고 가까우면 미는 힘을 발생시키며 댐퍼처럼 그 정도를 감쇠시키는 항으로 구성되어 응집과 분리를 위한 역할을 한다. 이를 자세하게 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\mathbf{u}_i^{CS} = \frac{\lambda}{N} \sum_{j=1}^N \{ \phi_1(\mathbf{p}_{ij})(\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \} \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_i^{Aug} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [ \sigma_{ij} \{ \phi_2(\mathbf{p}_{ij}, \mathbf{v}_{ij}) + \phi_3(\mathbf{p}_{ij}) \} \cdot (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i) ] \quad (12)$$

여기서  $N$ 은 총 객체 수,  $\lambda > 0$ ,  $\sigma > 0$ ,  $\mathbf{p}_{ij} = \mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j$ ,  $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j$ 를 의미한다.  $\phi_k(\cdot)$ 와  $\sigma_{ij}$ 는 식 (13), 식 (14)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \phi_1(\mathbf{p}_{ij}) &= 1 / (1 + |\mathbf{p}_{ij}|^2)^\beta \\ \phi_2(\mathbf{p}_{ij}, \mathbf{v}_{ij}) &= \frac{K_1}{2|\mathbf{p}_{ij}|^2} \langle \mathbf{v}_{ij}, \mathbf{p}_{ij} \rangle \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \phi_3(\mathbf{p}_{ij}) &= \frac{K_2}{2|\mathbf{p}_{ij}|} (|\mathbf{p}_{ij}| - 2R) \\ \sigma_{ij} &= \sigma_1 e^{-\frac{\theta_{ij}}{\sigma_2}} \end{aligned} \quad (14)$$

$\beta > 0$ ,  $K_1 > 0$ ,  $K_2 > 0$ 의 관계를 가지며,  $\sigma_1 > 0$ ,

$\sigma_2 > 0$ 의 조건을 갖는다.  $\theta_{ij}$ 는  $\mathbf{v}_i$ 와  $\mathbf{v}_j$  간의 사이각이며 아래와 같이 구해진다.

$$\theta_{ij} = \text{acos} \left( \frac{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j}{|\mathbf{v}_i| |\mathbf{v}_j|} \right) \quad (15)$$

식 (11)과 식 (12)는 고려해야 하는 무인기 객체의 정보를 모두 더하는 구조를 가진다. 따라서 때비행을 위한 유도명령을 생성함에 있어 유연성과 확장성을 가질 수 있다.

### 2.2.3 충돌 회피 유도: 포텐셜 필드 기법

군집 비행을 위한 무인기 객체의 수가 많아지면 식 (11)과 식 (12)에서 서술한 것과 같이 가까이 있는 두 객체 간의 발생하는 힘은  $N$ 으로 나누어지면서 점점 작아지게 된다. 이에 따라 밀접한 두 객체를 분리시키는 힘이 감소하는 동시에 충돌할 위험성이 높아진다. 이러한 문제를 해결하고자 본 논문에서는 객체수와 관계없이 분리 유도가 이루어지도록 포텐셜 필드 기법을 적용한다. 근접 비행 시 이웃으로 식별된 무인기의 경우 무리지어 비행을 하는 동시에 밀어내는 힘을 발생시켜 충돌을 방지한다. 행인으로 식별될 경우 더 강한 포텐셜 필드로 멀리서부터 충돌을 방지하는 유도명령을 생성하도록 하였다. 이때 사용되는 포텐셜 필드는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{v}}_i &\equiv \mathbf{u}_i^{PF} = - \sum_{j=1}^N B_s(r_{ij}, B_a, B_b, B_c, B_d) \hat{\rho}_{ij} \\ \hat{\rho}_{ij} &= \frac{\rho_{ij}}{|\rho_{ij}|} \\ \rho_{ij} &\equiv \begin{bmatrix} x_{j,1} - x_{i,1} \\ y_{j,2} - y_{i,2} \\ \text{sign}(z_{j,3} - z_{i,3}) r_{ij} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

$r_{ij}$ 은 두 객체간 상대거리를 의미한다.  $x, y, z$ 은 관성좌표계 기준 각 비행체의 3축 위치를 의미한다.

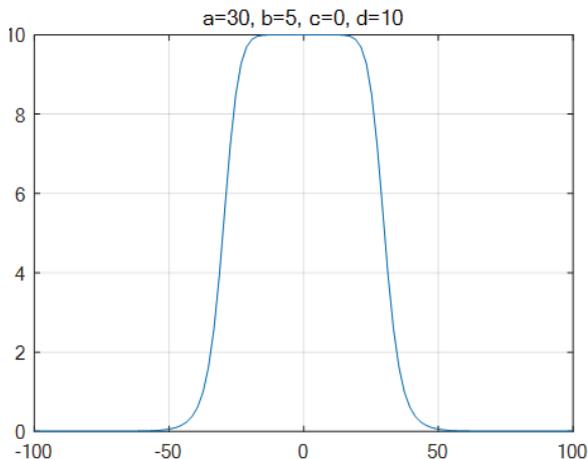


Fig. 3. Potential Field

설계 매개변수  $B_s(r_{ij}, B_a, B_b, B_c, B_d)$ 는 아래와 같이 정의한다.

$$B_s(r_{ij}, B_a, B_b, B_c, B_d) \equiv \frac{B_d}{1 + \left(\frac{r_{ij} - B_c}{B_a}\right)^{2B_b}} \quad (17)$$

좌표  $x$ 축을  $r_{ij}$ 으로 설정하고  $B_a = 30, B_b = 5, B_c = 0, B_d = 10$ 와 같이 파라미터를 설정하면, Fig. 3과 같이 포텐셜 필드를 생성할 수 있다.

### 2.2.4 통합 유도 명령 생성

벡터필드, 증강 쿠키-스메일 모델, 포텐셜 필드 기법이 적용된 통합 유도법칙은 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{u}_i = w_{VF} \mathbf{u}_i^{VF} + w_{ACS} \mathbf{u}_i^{ACS} + w_{PF} \mathbf{u}_i^{PF} \quad (18)$$

$w_{\{.\}}$ 은 각 유도 기법의 가중치를 의미한다. 상기 가중치는 비행 및 상황을 고려해 경험적(heuristic) 방법으로 설계되었으며, Table 2와 같다. 표에서 항목은 각 집결 비행(G), 경로점 비행(W), 선회 비행(L), 개별 비행(I)을 의미한다.

집결 비행에서 요구하는 기동이 모든 객체가 특정 지점 또는 지역에 최대한 뭉쳐있는 것이다. 때문에 때비행과 관련된 기동은 요구하지 않고, 지정된 지점을 중심으로 짧은 반경으로 선회하며 충돌 회피만을 고려하고자 한다. 따라서 증강 쿠키-스메일 모델 가중치를 0.0으로 설정한다.

경로점 및 선회 비행의 경우에는 때비행이 중요한 기동이기에 증강 쿠키-스메일 모델 가중치를 0.9로 설계한다.

개별 비행의 경우 경로점 비행이나 선회 비행과 동일한 가중치를 사용하지만, 각각의 객체들이 모두 다른 작업을 부여받는 경우 다른 객체가 모두 행인이 되기 때문에 증강 쿠키-스메일 모델에 부여된 0.9라는 가중치는 사실 의미가 없어진다. 그러나 이를

Table 2. Weight for each Maneuver

	G	W	L	I
Vector Field for path-following: $w_{VF}$	1.0	0.1	0.1	0.1
Augmented Cucker-Smale Model: $w_{ACS}$	0.0	0.9	0.9	0.9
Potential Field for Passerby: $w_{PF}$	1.0	1.0	1.0	1.0
Potential Field for Neighbor: $w_{PF}$	1.0	1.0	1.0	1.0

0.0으로 결정하지 않은 이유는 N대의 객체가 있을 때 그보다 작은 수의 작업이 요구되는 경우 작업할 당이 이루어지는 과정에서 소수는 같은 작업을 수행하기로 합의가 이뤄질 수 있다. 이와 같이 같은 작업을 수행하기로 합의된 객체 간에는 서로 이웃으로 인식하고 때비행을 수행해야 하는 경우를 대비하여 0.9로 설계한다.

포텐셜 필드 가중치는 모두 1.0으로 고정한다. 포텐셜 필드는 그림 3과 같이 일정 거리 이상의 경우 유도명령 값이 0으로 정해진다. 이렇게 충돌이 발생하지 않는 경우 경로 추종과 때비행 기동으로 유도명령을 생성하면 되지만, 충돌이 예상되는 경우에는 충돌 회피를 위한 명령을 우선하기 위해 1.0이라는 가중치를 부여한다. 해당 가중치는 때비행을 위한 증강 쿨커-스메일 모델 가중치와 상충하는 유도명령을 생성한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통한 경험적 분석 방법으로 때비행 추종 성능을 만족하며, 충돌 회피가 가능한 가중치를 도출하였다.

비행 기동 형태에 따라 생성되는 유도명령은 다음과 같이 설계된 매개 변수들에 의해 결정된다.

**- 집결 비행(Gathering Flight)**

집결 비행 시 기본적으로  $VF_{cl}$ 을 사용한다. 고정익 기 기준에서 최대한 좁은 반경 안에 집결하는 것이 목표인 동시에 회피 기동을 위한 여유가 있어야 하므로, 롤각 30도에서 선회할 수 있는 반경을 속도 명령에 따라 계산토록 설계한다. 또한 원 경로를 그릴 수 있도록 힘의 크기와 방향을 결정해주는 형상 결정 매개변수인  $p_{cl}$ 의 크기는 상수로 고정했다.  $p_{cl}$ 의 부호는 운용자에 의해 결정되며, 양수인 경우 시계방향(CW, clockwise) 회전을, 음수인 경우 시계반대방향(CCW, counter-clockwise)로 회전하게 된다.

$$\begin{aligned} r_d &= \frac{v_{gcmd}}{9.806 \times \tan(30deg)} \\ |p_{cl}| &= 0.4 \end{aligned} \quad (19)$$

행인(p, passerby)과 이웃(n, neighbor)들과의 충돌을 방지하기 위한 포텐셜 필드의 매개 변수는 Table 3과 같이 설정한다.

**- 경로점 비행(Waypoint Flight)**

다중 경로점을 추종위해  $VF_{cl}$ 을 사용했다. 사용자가 두 점을 입력해주면 NED 좌표계에서 두 점 간

**Table 4. Parameters of Aug. Cucker-Smale model**

$\beta$	$\lambda_H$	$\lambda_V$	$K_1$	$K_2$	$R$	$\sigma_{1,H}$	$\sigma_{1,V}$
0.25	1.0	0.3	0.7	0.1225	15.0	1.0	0.5

의 거리를  $r_{maj}$ 로, 사용자가 입력한  $r_d$ 를  $r_{min}$ 로, 두 점을 이은 직선이 NED 좌표계에서 이루는 각을  $\theta_{rot}$ 으로 스스로 계산토록 설계한다.

경로점 비행의 경우에는 경로점으로 정의된 타원의 궤적을 따라 비행하는 동시에 때비행이 필요하기 때문에 증강 쿨커-스메일 모델 기반의 유도법칙도 활용된다. 이를 위한 매개 변수들은 Table 4와 같이 설계한다. 아래 첨자 H와 V는 증강 쿨커-스메일 식 (11)과 (14)의  $\lambda$ 와  $\sigma_1$ 에서 롤과 관련 있는 수평면 상에서의 힘과 고도 분리와 관련 있는 수직면 상에서의 기동 특성을 다르게 설정하고자 값을 분리한 것이다. 행인과 이웃들과의 충돌 회피를 위한 포텐셜 필드는 앞서 설명된 집결 비행 때와 동일한 구조와 매개 변수들을 사용한다.

**- 선회 비행(Loitering Flight)**

선회 비행 때 사용하는 벡터 필드는 집결 비행 때와 동일한  $VF_{cl}$ 이다. 다만 선회 반경  $r_d$ 를 운용자가 입력한 값으로 설정된다는 것이 다를 뿐이다. 때비행을 위해 사용된 증강 쿨커-스메일 모델과 관련된 매개 변수와 충돌 회피를 위해 설계된 포텐셜 필드에 사용된 매개 변수는 집결 비행 때와 동일한 값을 사용한다.

**- 개별 비행(Individual Flight)**

개별 비행 때 사용하는 벡터 필드는 집결 비행 때와 동일한  $VF_{cl}$ 이다. 다만 선회 비행 때와 마찬가지로 선회 반경  $r_d$ 를 운용자가 입력한 값으로 설정한다. 때비행을 위해 사용된 증강 쿨커-스메일 모델과 관련된 매개 변수도, 행인 및 이웃과 충돌하지 않고자 설계된 포텐셜 필드에 사용된 매개 변수도 모두 집결 비행 때와 동일한 값을 사용한다.

**2.3 비행시험 결과**

설계한 통합 유도법칙을 포함한 분산형 군집제어 알고리즘 검증을 위해 고정익 소형무인기를 이용한 비행시험을 수행하였다[11,12]. 대상 무인기 형상은 Fig. 4와 같이 보관 및 지상 이동이 용이하며, 신속

**Table 3. Parameters of Potential Filed**

	$B_a$	$B_b$	$B_c$	$B_d$
p	$4.0 \times v_{gcmd}$	$0.3 \times v_{gcmd}$	0.0	25.0
n	$-\frac{2.5}{15}(v_{gcmd} - 20) + 5$	$-\frac{1.3}{15}(v_{gcmd} - 20) + 1.2$	0.0	5.0

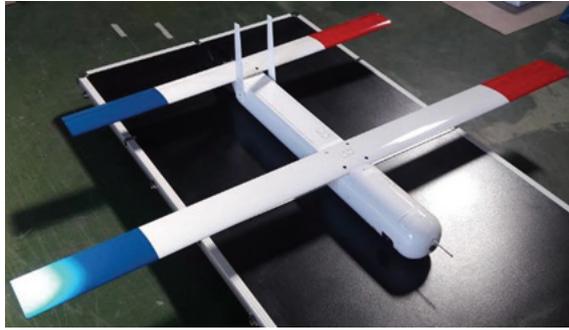
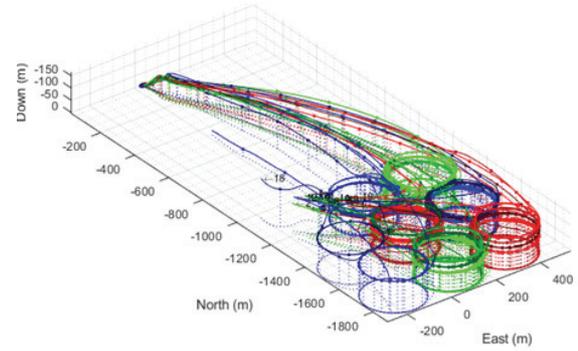


Fig. 4. UAV for Flight Test[12]

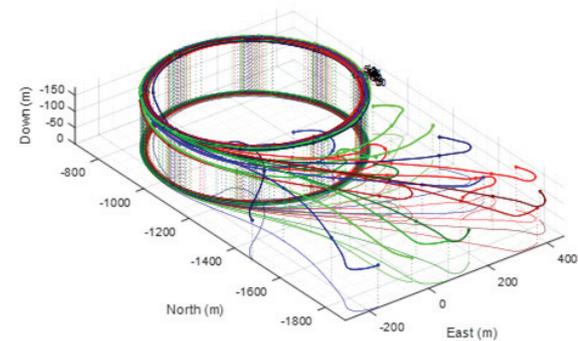
전개가 가능하도록 설계하였다. 비행을 위해 최소의 인원으로 통제 및 모니터링이 가능한 지상통제장비를 설계하였으며, 무인기 이륙 시 발사장비를 활용하였다. 비행시험은 20대 군집 비행을 목표로 비행 대수를 늘려가며 여러 차례의 비행을 수행하였으며, 19대 군집 비행을 통해서 통합 유도법칙의 성능을 확인할 수 있었다.

Figure 5는 19대 고정의 소형무인기의 이륙, 개별, 선회, 경로점 비행을 포함한 궤적을 나타낸다. Fig. 5(a)는 각 무인기들이 이륙 후 지상 운용자에 의해 지정된 위치에서 경로점 비행하는 궤적이며, 이후 군집 선회 비행의 궤적을 Fig. 5(b)에서 나타내고 있다. 서로 멀리 떨어져있던 무인기가 몰려오면서도 서로 충돌하지 않으며 한 덩어리로 잘 뭉쳐서 비행함을 확인할 수 있다.

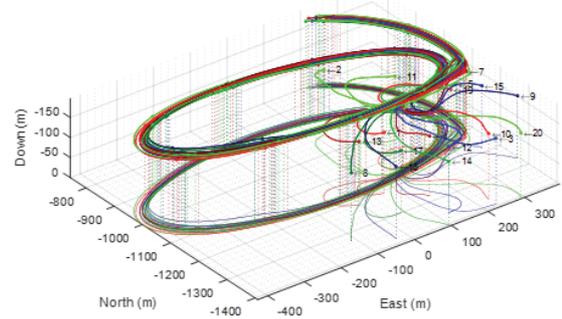
Figure 5(c)는 선회 비행에서 경로점 비행으로 전환하고, 마지막으로 다시 개별 비행으로 전환하는 궤적을 도시한다. Fig. 6에서는 군집 비행-Fig. 5(c)- 중 객체 간 상대거리를 나타내는 그래프이다. 비행 결과에서 보이는 것과 같이 모두가 전환되면서도 무인기 간 거리를 잘 유지함을 확인할 수 있다. 경로점 비행에서 개별 비행으로 전환되는 1,140초 상대 거리 결과를 보면, 군집 무인기들이 산개되는 시점에서 서로 무인기 간 거리를 잘 벌리면서 각자 위치로 돌아가는 것을 확인할 수 있다.



(a) Take-off → Individual Flight



(b) Individual Flight → Loitering



(c) Loitering → Waypoint → Individual Flight

Fig. 5. Flight Test Results: Trajectory of Swarm Flight

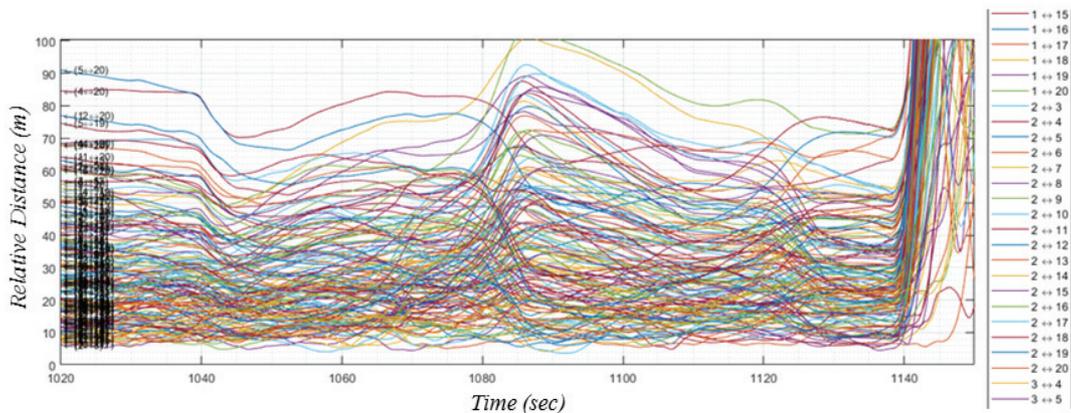


Fig. 6. Flight Test Results: Relative Distance

### III. 결 론

본 논문에서는 고정익 소형무인기 군집 비행을 위한 군집 유도 알고리즘을 제시하였다. 군집 비행을 통한 임무 수행 시 요구되는 작업과 기동을 식별하였으며, 이를 충족하기 위한 통합 유도법칙을 설계하였다. 경로 추종을 위해 벡터 필드 기반 유도법칙을 이용하였으며, 폐비행을 위해 객체들의 정렬과 응집/분리가 가능한 증강 쿠커-스메일 모델 기반 유도법칙을 설계하였다. 포텐셜 필드 기반 유도법칙을 통해 군집 비행 시 객체 간 충돌 회피 명령을 생성토록 하였다. 또한, 다수 무인기의 군집 임무 시 필요한 비행 기동에 따라 통합 유도법칙에 필요한 가중치를 제시하였다. 19대 고정익 소형무인기를 이용한 비행 시험을 통해 설계된 경로 추종, 폐비행, 충돌 회피에 대한 통합 유도법칙의 성능을 확인하였다.

본 연구를 통해 소형 고정익 무인기의 군집 비행을 위한 분산형 군집제어 기술이 확보되었다고 판단된다. 본 연구는 동종의 무인기에 적용될 수 있는 제어 기술로써 향후 이종 다수의 무인기를 운용할 수 있는 군집 제어 기술, 다수 비행체 동시 운용 기술 등에 활용 가능할 것으로 보인다.

### References

- 1) Floreano, D. and Wood, R. J., "Science, Technology and the Future of Small Autonomous Drones," *Nature*, Vol. 521, 2015, pp. 460~466.
- 2) Kim, K. and Kim, J., "Development Direction and Trend of Swarm Drones Leading Future Warfare," *Defense and Technology*, Vol. 479, January 2019, pp. 98~109.
- 3) Kim, T. and Kim, S., "Technology and Development Trends for Swarm Drone," *Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 25, No. 2, June 2019, pp. 31~36.
- 4) <http://www.pabloair.com/>
- 5) Myung, H. and Lim, H., "Research and Development Trend for Swarm Unmanned Aerial Vehicles", *Defense Science & Technology Plus*, Vol. 2020, July 2020, pp. 420~425.
- 6) 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.
- 7) 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*, November 2019, pp. 368~369.
- 8) Lim, S., Song, Y., Choi, J., Myung, H., Lim, H. and Oh, H., "Decentralized Hybrid Flocking Guidance for a Swarm of Small UAVs," *Proceeding of the RED-UAS 2019*, pp. 287~296.
- 9) Lim, S., "Guidance Laws using Vector Field to Control Arrival Angle, Time, and Speed for UAVs," *Ph.D. Dissertation*, KAIST, 2013.
- 10) Jung, W., Lim, S., Lee, D. and Bang, H., "Unmanned Aircraft Vector Field Path Following with Arrival Angle Control," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2016, Vol. 69(1-4), pp. 347~360.
- 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*, July 2020, pp. 557~558.
- 12) Myung, H., Jeoung, J., Kim, D., Seo, N., Kim, Y., Lee, J. and Lim, H., "Research of Small Fixed-Wing Swarm UAS," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 49, No. 12, 2021, pp. 971~980.