JANT 한국항행학회논문지
Journal of Advanced Navigation Technology

항행 및 항법

**J. Adv. Navig. Technol.** 25(3): 211-216, Jun. 2021

# 패킹을 이용한 다수 무인기의 유동적 대형 형성 알고리즘

# Flexible Formation Algorithm for Multiple UAV Using the Packing

김효중 · 김정훈 · 김문정 · 유창경*
인하대학교 항공우주공학과

**Hyo-Jung Kim · Jeong-Hun Kim · Moon-Jung Kim · Chang-Kyung Ryoo***
Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon, 21999, Korea

**[요 약]**

다수 무인기를 이용한 시스템은 정찰, 네트워킹, 항공 촬영 등 다양한 목적으로 활용되고 있다. 이러한 시스템에서 다수 무인기로 구성된 대형을 형성하고 유지하는 것은 필수적이다. 본 논문에서는 다수 무인기의 대형을 형성하기 위한 자율화된 분산형 제어를 수행하는 알고리즘을 제안하였다. 제어명령은 근접 무인기 또는 임무 영역으로부터 서로 밀어내는 방향으로 작용하는 2차 시스템 형태의 힘을 고려하였다. 제어명령은 외부의 개입 없이 계측과 통신으로부터 획득되는 상대위치/속도를 통해 계산된다. 이는 개별 무인기들이 기준거리를 추종하도록 하며 임무영역 안에 겹치지 않고 최대한 조밀하게 배치되도록 한다. 기준거리 결정에는 채우기 문제를 풀기 위한 최적화 기법과 유사한 방식을 적용하였다. 임무영역은 형성하고자 하는 대형의 외곽선으로 정의되며 임무에 따라 유동적으로 설정될 수 있다. 제안한 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 복잡성과 확장성을 고려한 영역에서 약 26.94초에 대형이 형성되며 약 71.91%의 채우기 밀도를 가지는 것을 확인하였다.

**[Abstract]**

Multiple UAV System has been used for various purposes such as reconnaissance, networking and aerial photography. In such systems, it is essential to form and maintain the formation of multiple UAVs. This paper proposes the algorithm that produces an autonomous distributed control for each vehicle for a flexible formation. This command is a repulsive force in the form of the second-order system by the nearest UAV or mission area. The algorithm uses the relative position/speed through sensing and communication for calculating the command without external intervention. The command allows each UAV to follow the reference distance and fill the mission area as densely as possible without overlapping. We determine the reference distance via optimization technique solving the packing problem. The mission area comprises the desired formation outline and can be set flexibly depending on the mission. Numerical simulation is carried out to verify the performance of the proposed algorithm under a complex and flexible environment. The formation is formed in 26.94 seconds and has a packing density of 71.91%.

**Key word :** Autonomous, Circle packing, Distributed control, Formation, Multiple UAV.

**https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.3.211**

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-CommercialLicense(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Received** 1 June; **Revised** 9 June 2021
**Accepted (Publication)** 29 June (30 June 2021)

***Corresponding Author, Chang-Kyung Ryoo**

**Tel:** +82-032-720-9015
**E-mail:** ckryoo@inha.ac.kr

## Ⅰ. 서 론

다수 무인기를 이용한 대형 형성은 군집 지능 분야의 핵심 기능으로써 정찰, 네트워킹, 항공 촬영 등의 다양한 임무에 활용될 수 있고, 드론 쇼나 올림픽과 같은 현대 축제의 개막을 책임지는 한 요소로 사용될 수 있다. 다수 무인기의 편대 비행을 통해 피탐성을 낮추고 높은 공력 효율을 도모한 연구에서는 선도-추종 방식을 사용하였으며 유도 법칙을 통해 기하 관계에서 얻어지는 가상의 점에 추종기를 위치시켰다[1].

다양한 대형을 형성한 기존의 연구들에서도 선도-추종 방식이 주로 사용되고 있다. 가상의 힘을 도입하여 대형을 형성하는 연구에서는 사전에 계획된 경로를 추종하는 선도 로봇과 가상의 인/척력을 통해 상호 간의 충돌을 회피하고 대형을 유지하며 선도 로봇을 추종하는 로봇을 이용하여 대형을 형성한다[2]. 그러나 선도-추종 방식은 선도 로봇의 손실이 임무 전체의 실패를 초래할 수 있다. 개체의 손실 방지를 위해 유동적으로 장애물을 회피한 연구에서는 선도-추종 방식에 의해 형성된 대형으로 피할 수 없는 장애물을 조우하면 일시적으로 대형을 변화 시켜 통과한 후 다시 원래대로 복귀한다[3]. 또한, 선도 로봇이 손실되면 추종 로봇 중 선도 로봇을 자율적으로 선정하고 기하 관계에 따라 다시 대형을 형성하여 손실에 대한 강건성을 높인 연구도 있다[4]. 본 논문의 선행 연구에서는 자율화된 분산형 제어 방식을 사용하였으며 근접 무인기와의 통신을 기반으로 계산되는 가상의 인/척력을 통해 대형을 형성하였다[5]. 개별 무인기들이 사용자의 개입이나 선도기 없이 자율적으로 대형을 형성하여 선도-추종 방식보다 자율성이 증대된 장점을 지니고 있으나 설정된 기준거리만큼 이격되어 집결하는 형태만 가능하기 때문에 다양한 대형이 고려될 필요성이 있다.

본 논문에서는 선행 연구를 발전 시켜 유동적으로 대형을 형성하는 알고리즘을 제시하였다. 개별 무인기는 다른 무인기와 경계에 대한 정보를 자율적으로 획득하고 상대위치/속도를 통해 서로를 밀어내기 위한 척력을 계산하여 대형을 형성한다. 경계는 원하는 대형의 외곽선으로 정의하며 무인기들로 내부 영역을 채우면서 대형을 형성한다. 채우기 문제(packing problem)는 주어진 영역에 개체들을 겹치지 않게 채우는 구성과 개수를 찾는 문제로써 영역과 개체의 형태에 따라 다양한 변형이 존재한다. 대부분은 NP-Hard(non-deterministic polynomial-time hard) Problem이며 해석기하적으로 다루기 어려운 경우는 수치적인 최적화 방법을 통해 해결되고 있다[6]. 본 논문에서는 채우기 문제의 최적화 방법 중에 하나를 적용하여 직접 최적화를 수행하지 않고도 단순한 연산을 통해 채우기 문제의 해를 구하여 대형을 형성하였다. 또한 선행 연구의 장점을 가져 연산 시스템의 부하를 최소화할 수 있고 자율화된 대형 제어가 가능하다. 2장에서는 시스템 모델에 관해 설명하며 3장에서는 본 알고리즘을 통해 산출되는 제어명령에 대해 논의한다. 4장에서는 시뮬레이션을 통해 본 알고리즘의 성능을 분석하며 5장에서는 결론을 내린다.

## Ⅱ. 시스템 모델

### 2-1 좌표계 정의

본 논문에서 제안하는 대형 형성 알고리즘은 2차원 평면에서 수행된다고 가정하며, 임무영역 내에서 개별 무인기의 운동을 표현하기 위해 $x$, $y$축으로 이루어진 평면 직교좌표계를 고려한다. 평면 직교좌표계에서의 위치벡터와 속도벡터는 식 (1), (2)와 같이 표현된다. $x$, $y$, $v_x$, $v_y$는 각각 $x$, $y$축에 대한 위치와 속도 성분이다.

$$\vec{p} = (x, y) \tag{1}$$
$$\vec{v} = (v_x, v_y) \tag{2}$$

### 2-2 무인기 모델

개별 무인기는 고도를 유지하며 2차원 평면에서 운동하는 질점모델로 가정한다. $N$개의 무인기에 대한 무인기 $i$의 운동방정식은 식(3)과 같다. 무인기의 제어명령 $\overrightarrow{U_i}$는 가속도를 고려하며 다음 장에서 논의하기로 한다.

$$\begin{aligned} \dot{\vec{p}}_i &= \vec{v}_i \\ \dot{\vec{v}}_i &= \overrightarrow{U_i} \end{aligned} \tag{3}$$

무인기 $i$와 $j$ 사이의 상대위치/속도 벡터는 식 (4), (5)와 같이 표현된다.

$$\overrightarrow{d_{ij}} = \vec{p}_j - \vec{p}_i \tag{4}$$
$$\dot{\overrightarrow{d_{ij}}} = \vec{v}_j - \vec{v}_i \tag{5}$$

본 논문에서 고려하는 운용 무인기의 성능은 표 1과 같다.

### 2-3 임무영역 모델

임무영역은 원하는 대형의 외곽선을 경계로 하는 닫힌 영역으로 정의한다. 개별 무인기는 탐지 장비를 통해 가장 가까운 경계의 한 점과의 상대위치를 계산할 수 있다고 가정하며 경계와의 상대위치/속도는 식 (6), (7)과 같이 표현된다. 단, 경계는 움직이지 않는다고 가정한다.

**표 1.** 운용 무인기 성능
**Table 1.** The Performance of UAV.

| Specification | Value |
|---|---|
| Visual Range | 20 $m$ |
| Sensing Range | 20 $m$ |
| Max. Maneuver Acc | 9.81 $m/s^2$ |

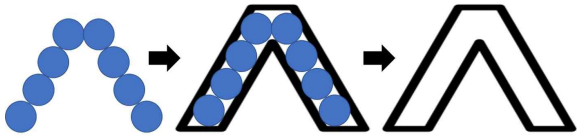


**그림 1.** 임무영역 설정 예시
**Fig. 1.** Example of Setting a Mission Area

$$\vec{d}_{ib} = \vec{p}_b - \vec{p}_i \tag{6}$$

$$\dot{\vec{d}}_{ib} = \vec{v}_b - \vec{v}_i = -\vec{v}_i \tag{7}$$

임무영역과의 척력을 통해 대형이 형성되므로 임무영역이 원하는 대형의 특성을 보이도록 설정하는 것이 중요하다. 임무영역 설정에 대한 예시는 그림 1과 같다. 임무영역은 사용자의 필요에 따라 다양한 형태로 설정될 수 있다.

## Ⅲ. 대형 형성 알고리즘

### 3-1 대형 형성 알고리즘 개요

대형 형성 알고리즘은 그림 2와 같이 크게 탐지/통신부, 기준거리 협의부, 제어명령 계산부 등 3가지 부분으로 구성된다. 탐지/통신부에서 획득한 무인기, 경계와의 상대위치/속도 정보를 기반으로 기준거리 협의와 제어명령 계산이 이루어진다. 기준거리 협의부에서는 통신 범위, 다른 무인기와의 거리, 경계와의 거리를 고려하여 기준거리를 산출한다. 제어명령 계산부에서는 앞 단계에서 획득 및 산출한 정보를 바탕으로 척력 기반의 제어명령을 생성한다. 중앙의 통제 시스템이나 외부에서의 개입 없이 제어명령이 생성되므로 분산형 제어가 가능하다. 이에 따라 무인기 수 증가에 따른 연산 시스템의 부하가 적으며 손실되는 무인기가 발생하여도 임무를 수행할 수 있다.

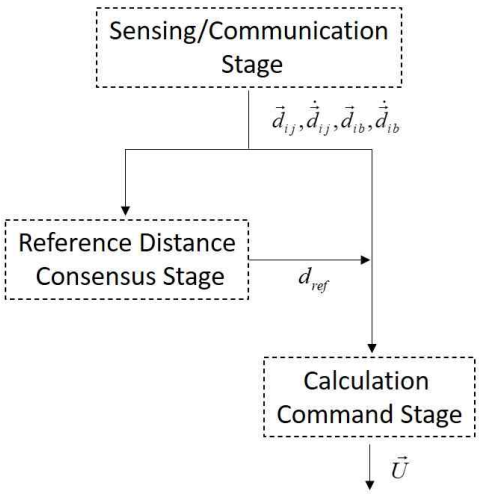



**그림 2.** 대형 형성 알고리즘 개요
**Fig. 2.** Overview of the Flexible Formation Algorithm

### 3-2 탐지/통신부

탐지/통신부에서는 탐지 장비를 통해 무인기와 가장 가까운 경계의 상대위치를 측정하며 근접한 무인기들과의 통신을 통해 상대위치/속도를 파악한다. 탐지와 통신은 지연 없이 즉각적으로 이루어진다고 가정한다. 탐지/통신 범위와 임무영역의 형태에 따라 안정적인 대형 형성에 필요한 무인기의 최소 대수가 결정된다. 탐지/통신 범위의 상한은 운용 무인기의 성능에 따라 결정되며 하한은 다음 절에서 정의하는 기준거리에 의해 결정할 수 있다.

### 3-3 기준거리 협의부

대형 형성 알고리즘의 목표는 무인기들이 일정한 간격으로 배치되어 임무영역을 겹치지 않고 채우는 것이다. 개별 무인기가 차지하는 영역은 원으로 가정한다. 이 때 원의 반지름을 기준거리로 정의하며 무인기마다 개별적으로 처리된다.

무인기 $i$의 기준거리 $d_{ref_i}$는 식 (8)과 같이 2-2절, 2-3절에서 정의한 다른 무인기 또는 경계와의 상대위치를 통해 계산된다.

$$d_{ref_i} = \begin{cases} 0.5\left|\vec{d}_{ij}\right| + \alpha & ,\left(\left|\vec{d}_{ij}\right| \le Visual\ Range\right) \\ \left|\vec{d}_{ib}\right| + \alpha & ,\left(\left|\vec{d}_{ij}\right| > Visual\ Range\right) \end{cases} \tag{8}$$

$$Visual\ Range = 1.1 \times \left(d_{ref_i} + d_{ref_j}\right) \tag{9}$$

기준거리는 원 영역의 반지름이기 때문에 무인기와의 거리의 절반만 사용해야 하며 무인기 $j$는 가장 가까운 무인기이다. 통신 범위가 무인기 $i$, $j$의 기준거리 합보다 큰 경우에 통신이 가능하다. 운용 무인기 성능 한계까지 통신 범위를 늘리는 것은 본 알고리즘 운용에 영향이 없지만 분산형 제어 방식의 구현과 연산 자원의 최소화를 위해 식 (9)와 같이 통신 범위의 하한으로 기준거리 합의 10%를 더하여 $Visual\ Range$를 설정하였다. 통신이 가능한 경우에는 두 무인기의 상대거리를 기준거리 계산에 사용하며, 반대의 경우에는 경계와의 거리를 사용한다.

기준거리를 통해 임무영역을 채우기 위해서는 무인기가 차지하는 영역이 임무영역을 넘어서지 않는 한 기준거리를 지속적으로 증가시켜야 한다. 영역을 채우기 위한 방법으로 Particle Swarm Optimization의 fitness function과 유사한 규칙을 적용하였다[6]. 식 (8)의 $\alpha$는 영역을 채우기 위한 변수로써, 무인기들과 경계의 거리 관계에 의해 식 (10)과 같이 결정된다.

$$\alpha = \begin{cases} +0.1 : \left|\vec{d}_{ij}\right| > Visual\ Range \\ -0.1 : \left|\vec{d}_{ib}\right| < d_{ref_i} \end{cases} \tag{10}$$

다른 무인기들과의 거리가 $Visual\ Range$보다 큰 경우는 무인기 $i$의 기준거리를 증가시킨다. 경계와의 거리가 기준거리보다 작은 경우는 무인기 $i$의 영역이 임무영역을 넘어선 상태이기 때문에 기준거리를 감소시킨다. 기준거리의 단위 증감량은 0.1

로 설정하였다.

개별 무인기의 기준거리가 각각 계산된 후에 근접한 두 무인기가 통신 범위 내에 존재하면 통신을 통해 서로의 기준거리의 평균값을 개별 무인기의 기준거리로 결정한다. 지속적으로 근접한 무인기와 기준거리의 평균값을 취하기 때문에 시간이 흐름에 따라 모든 무인기들이 기준거리를 공유할 수 있다.

### 3-4 제어명령 계산부

제어명령 계산부에서는 탐지/통신부에서 획득한 위치/속도 정보와 기준거리 협의부에서 도출한 기준거리를 바탕으로 식 (11)~(13)과 같이 제어명령을 생성한다.

$$D_{ref} = d_{ref_i} + d_{ref_j} \tag{11}$$

$$\overrightarrow{n_{cmd_i}} = \begin{cases} -\dfrac{k_n}{(|\overrightarrow{d_{ij}}| - D_{ref})^2}\dfrac{\overrightarrow{d_{ij}}}{|\overrightarrow{d_{ij}}|} + c_n\overrightarrow{d_{ij}} & ,(|\overrightarrow{d_{ij}}| \le D_{ref}) \\ 0 & ,(|\overrightarrow{d_{ij}}| > D_{ref}) \end{cases}$$

$$|\overrightarrow{n_{cmd_i}}| \le n_{\max}$$

$$\overrightarrow{b_{cmd_i}} = \begin{cases} -\dfrac{k_b}{(|\overrightarrow{d_{ib}}| - d_{ref_i})^2}\dfrac{\overrightarrow{d_{ib}}}{|\overrightarrow{d_{ib}}|} + c_b\overrightarrow{d_{ib}} & ,(|\overrightarrow{d_{ib}}| \le d_{ref_i}) \\ c_b\overrightarrow{d_{ib}} & ,(|\overrightarrow{d_{ib}}| > d_{ref_i}) \end{cases} \tag{12}$$

$$\overrightarrow{U_i} = \left(\overrightarrow{n_{cmd_i}} + \overrightarrow{b_{cmd_i}}\right) \tag{13}$$

$\overrightarrow{n_{cmd}}$와 $\overrightarrow{b_{cmd}}$는 각각 근접 무인기에 의한 제어명령, 경계에 의한 제어명령을 의미하며 가속도 차원을 갖는다. $\overrightarrow{U_i}$는 2-2절에서 논의한 운동방정식의 제어명령이며 $\overrightarrow{n_{cmd}}$와 $\overrightarrow{b_{cmd}}$의 합벡터이다. 표 1에서 정의한 최대 기동 가속도에 의해 그 크기가 제한된다. $\overrightarrow{n_{cmd}}$와 $\overrightarrow{b_{cmd}}$은 선행 연구에 기반하며 가변적인 기준거리를 통해 대형 형성이 가능하도록 변형시켰다[5]. 기존에는 인/척력을 통해 일정한 기준거리를 유지하면서 이동하도록 하였으나 제안한 알고리즘은 다른 무인기와 경계로부터의 척력을 통해 전체 영역을 채운 상태로 정지하는 것을 목표로 한다.

$\overrightarrow{n_{cmd}}$의 기준거리는 무인기 $i$, $j$의 기준거리 합으로 정의한다. 기준거리보다 무인기 간 거리가 먼 경우에는 통신 제한으로 인해 상대위치/속도를 알 수 없으므로 명령을 발생시키지 않는다. $\overrightarrow{n_{cmd}}$가 과도하게 발생하면 $\overrightarrow{U_i}$가 임무영역 밖을 향하게 할 수 있으므로 $n_{\max}$을 통해 크기를 제한한다. $\overrightarrow{b_{cmd}}$의 기준거리는 무인기 $i$의 기준거리이며 $\overrightarrow{n_{cmd}}$와 달리 경계와의 거리가 기준거리보다 멀어져도 식 (7)에 따라 상대속도는 알 수 있기 때문에 이를 이용한 명령을 지속적으로 생성한다.

일반적으로 군집 알고리즘의 상대위치 항은 기준거리를 유지시키는데 기여하며 제안한 알고리즘에서는 지속적으로 변화하는 기준거리를 추종하도록 한다. 제어 상수 $k_n$, $k_b$는 상대위치 항의 가중치로 작용하며 최대 기동 가속도, $n_{\max}$와 함께 $\overrightarrow{U_i}$ 생성에 주요한 영향을 미친다.

**표 2.** 시뮬레이션 조건
**Table 2.** Simulation Conditions.

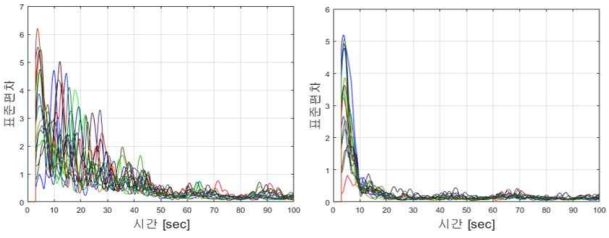
| Parameter | Description | Value |
|---|---|---|
| $N_{UAV}$ | Number of UAVs | 15 |
| $p$ | UAV's Position | [3, 3] + $N(0,1^2)$ |
| $v$ | UAV's Speed | 1 $(m/s)$ |
| $\psi$ | UAV's Heading | random (rad) |
| $k_n$ , $k_b$ | Control Gain | $15N_{UAV}$, $20N_{UAV}$ |
| $c_n$ , $c_b$ | Damping Coefficient | variable |
| $n_{\max}$ | Max. Command by the Nearest UAV | 5 $(m/s^2)$ |

상대속도 항은 상대위치 항과 평행한 벡터와 수직인 벡터로 분리할 수 있다. 평행한 벡터는 충돌회피에 기여하며 수직한 벡터는 속도를 정렬시켜 거동에 감쇠를 부여한다. 감쇠 계수 $c_n$, $c_b$는 상대속도 항의 가중치로 작용한다. 제어 상수와 감쇠 계수는 무인기 수에 비례하도록 설정하여 무인기 수에 상관없이 임무 수행이 가능하다. 본 알고리즘에서는 $\overrightarrow{n_{cmd}}$와$\overrightarrow{b_{cmd}}$가 지속적으로 발생하여 속도가 진동하기 때문에 가변적인 감쇠 계수를 사용하였다.

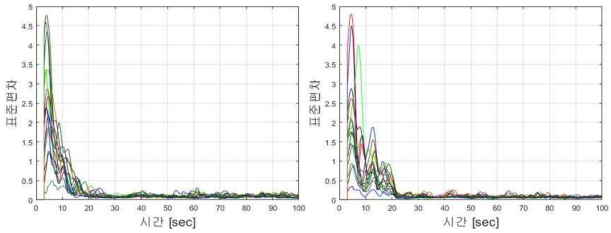
## Ⅳ. 시뮬레이션 결과

3장에서 제안한 대형 형성 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 환경은 i5-10400와 GTX 1660 Ti이며 MATLAB 프로그램의 2020a 버전을 사용하였다. 시뮬레이션 초기 조건은 표 2와 같고, 시뮬레이션에 사용한 시스템은 2장에서 제시하였다.

그림 3은 $20m \times 20m$ 크기의 정사각형 영역에서 표 2의 초기 조건을 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이며 감쇠 계수 변화에 따른 3초 동안의 위치 표준편차를 나타내었다. $x$, $y$ 좌표의 표준편차의 합을 사용하였으며 좌표 값에 대한 영향을 줄이기 위해 3초 동안의 값을 사용하였다. 단위 시간이 길어지면 위치 표준편차가 작아져서 성능 확인에 적합하지 않다. 감쇠 계수가 증가할수록 표준편차의 수렴 값이 작아지며 약 0.2의 값을 가진다. 또한 (b)~(d)에서 감쇠 계수가 커질수록 수렴시간이 증가하며 이는 초기 속력이 과도하게 감소될 때 대형 형성에 지연이 나타날 수 있음을 의미한다.




(a) $c_n = 0.1N$ $c_b = 0.2N$ (b) $c_n = 0.2N$ $c_b = 0.4N$




(c) $c_n = 0.3N$ $c_b = 0.6N$ (d) $c_n = 0.4N$ $c_b = 0.8N$

**그림 3.** 감쇠 계수 변화에 따른 무인기의 위치 표준편차

**Fig. 3.** Damping Coefficient Change into UAV's Standard Deviation of Position

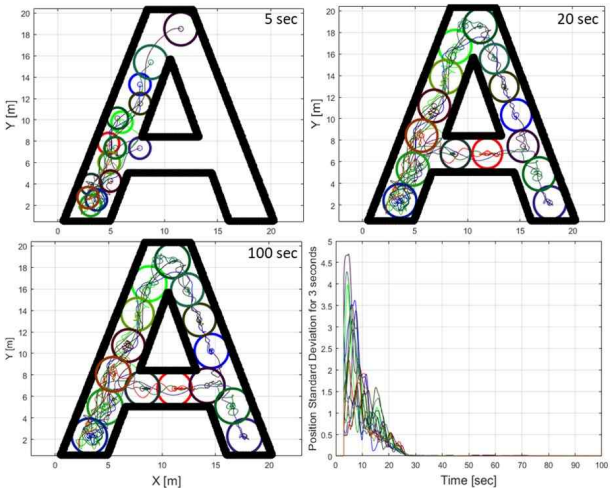



**그림 4.** 단일 시뮬레이션에서의 A 대형 형성 결과

**Fig. 4.** Result of the 'A' Formation in Single Simulation.

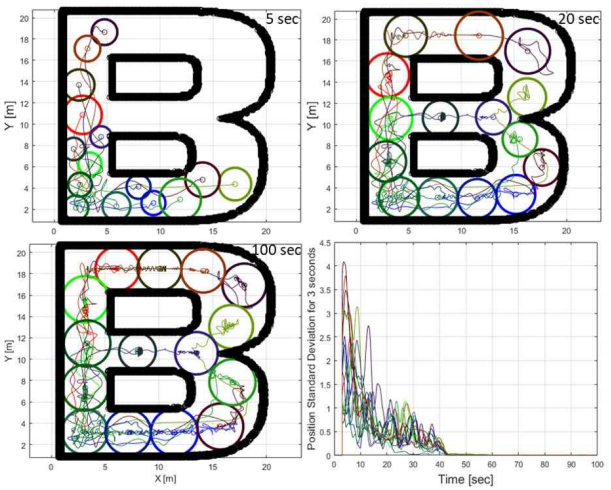



**그림 5.** 단일 시뮬레이션에서의 B 대형 형성 결과

**Fig. 5.** Result of the 'B' formation in Single Simulation.

그림 4와 5는 표 2의 시뮬레이션 초기 조건으로 임의의 영역에서 단일 시뮬레이션을 수행한 결과이며 대형을 형성하는 과정과 3초 동안의 위치 표준편차를 나타낸다. 임무영역은 알파벳 중 복잡한 직선, 곡선 형태를 대표할 수 있는 A, B 형태를 사용하였고 $20m \times 20m$ 크기의 격자에 들어가도록 정규화 시켰다.

**표 3.** 몬테카를로 시뮬레이션에서의 대형 형성 결과

**Table 3.** Result of the Formations in Monte-Carlo Simulation.

| Performance | A | | B | |
|---|---|---|---|---|
| | Mean | Std | Mean | Std |
| Convergence time (s) | 26.94 | 3.66 | 37.77 | 8.92 |
| Packing Density (%) | 71.91 | 3.01 | 64.83 | 2.97 |

**표 4.** 원 15개에 대한 여러 정다각형의 채우기 밀도

**Table 4.** 15 circles Packing Density in Regular Polygons.

| Regular Polygonal | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Packing Density(%) | 76.21 | 77.49 | 73.69 | 73.52 | 73.64 | 73.02 |

앞선 시뮬레이션의 결과를 적용하여 초기에 높은 감쇠 계수를 갖지 않도록 하였고 대형 형성의 기준을 정의하였다. 본 시뮬레이션의 초기 $c_n$과 $c_b$는 각각 $0.1N$, $0.2N$으로 하고 매 스텝마다 각각 0.002, 0.001씩 증가시켰다. 또한, 3초 동안의 위치 표준편차가 0.2에 도달하는 시점을 대형 형성이 완료된 수렴시간으로 정의하여 무인기를 정지비행 시켰다. 채우기 밀도는 무인기들의 영역 넓이 합과 전체 영역 넓이의 비율을 의미한다.

그림 4의 'A' 대형은 25.37초일 때 수렴하며 채우기 밀도는 약 73.92% 이다. 그림 5의 'B' 대형은 41.64초일 때 수렴하며 채우기 밀도는 66.56% 이다. 'B' 대형에서 중앙의 빈공간은 중앙에서의 폭이 기준거리보다 작기 때문에 나타나며 이에 따라 표준 편차가 진동하는 경향이 있다. 이는 운용 무인기의 수를 증가시킴으로써 협의된 기준거리와 중앙에서의 폭이 일치되면 해결이 가능하다. 무인기의 수가 부족하지만 무인기의 위치를 보면 대형이 형성된 것을 확인 할 수 있다.

표 3은 표 2의 초기조건 중 초기위치의 중심점을 영역 내부의 임의의 점으로 변경하고 300회 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였을 때의 대형 형성 결과를 나타낸다. 초기에 모든 무인기를 영역 전체를 대상으로 분산시키면 대형이 거의 형성되기 때문에 중심점을 이용하였다. 수렴 시간의 경우 두 대형에서 30초 전후로 나타난다. 무인기의 운용 속도는 $1m/s$이며 가장 긴 변의 길이를 $20m$로 정규화 시킨 영역을 고려하고 있으므로 대형 형성에 소요되는 시간은 적합하다고 볼 수 있다. 'B' 대형은 무인기 수가 부족한 경우이므로 적절한 위치와 기준거리가 정해지기 어려워 수렴의 편차가 크게 나타나며 채우기 밀도가 다소 낮게 나타난다. 'A' 대형의 채우기 밀도는 71.91%로 나타나며 표 4의 여러 정다각형의 채우기 밀도와 비교하였을 때 본 알고리즘의 채우기가 적절하게 수행되었음을 알 수 있다.

## Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 다수 무인기에 대한 자율화된 분산형 제어 방식을 통해 유동적으로 대형을 형성하는 알고리즘을 제안하였

다. 개별 무인기는 외부의 개입 없이 탐지/통신으로 획득한 근접한 무인기와 경계와의 상대위치/속도 정보만을 이용하여 제어명령을 생성한다. 다른 무인기와 경계와의 거리관계를 고려하여 기준거리를 계산하고 임무영역을 넘어서지 않는 한에서 기준거리를 지속적으로 증가시킨다. 기준거리 산출에는 채우기 문제의 최적화 방법과 유사한 규칙을 적용하여 임무영역에 대한 원 채우기가 수행되도록 하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 감쇠 계수 변화에 따른 무인기의 거동과 여러 임무영역에서 대형이 형성되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 운용 무인기의 수가 충분할 경우 빠르고 안정적으로 대형을 형성하며 부족한 경우에도 대형이 형성됨을 확인하였다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산한 채우기 밀도가 여러 정다각형과 유사함을 통해 채우기가 적절하게 수행되는 것을 확인하였다. 향후에는 본 알고리즘을 통해 형성된 대형을 유지하며 탐색 등의 다양한 임무에 적용시킬 예정이다.

## Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 "국제공동기술개발사업"의 지원을 받아 수행된 연구결과임(과제번호 P0014156).

**김 효 중** (Hyo-Jung Kim)
2020년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2020년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※관심분야 : 유도, 항법 및 제어

**김 정 훈** (Jeong-Hun Kim)
2016년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2016년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 통합과정
※관심분야 : 유도, 항법 및 제어

**김 문 정** (Moon-Jung Kim)
2020년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2020년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※관심분야 : 유도, 항법 및 제어

**유 창 경** (Chang-Kyung Ryoo)
1991년 2월 : 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학석사)
2006년 2월 : 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학박사)
2006년 9월 – 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 교수
※관심분야 : 유도, 항법 및 제어

## References

[1] H. M. Shin, J. H. Lee, D. I. You, and D. H. Shim, “Design the Guidance Law for Formation Flight of Multiple UAVs,” *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 2016 Spring Conference*, pp. 503-505, 2016.

[2] M. H. Tak and Y. H. Joo, “Formation control algorithm for swarm robots using virtual force,” *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 10, pp. 1428-1433, 2014.

[3] J. H. Park and U. K. Huh, “Obstacle Avoidance of Leader-Follower Robots Based on Potential Field and Flexible Formation,” *The Korean Institute of Electrical Engineers 2015 Summer Conference*, pp. 1389-1390, 2015.

[4] G. H. Lee and N. Y. Chong, “Neighbor-referenced coordination of multi-robot formations,” *The Journal of Korea Robotics Society*, Vol. 3, No. 2, pp. 106-111, 2008.

[5] H. J. Kwon, “A study of flexible formation for multiple multicopters,” MS dissertation, Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon, Korea, 2019.

[6] Y. B. Shin and E. Kita, “Solving two-dimensional packing problem using particle swarm optimization,” *Computer Assisted Methods in Engineering and Science,* Vol. 19, No. 3, pp. 241-255, 2017.