

## 技術論文

## 다수 무인항공기의 자동 편대비행 시험

송용규\*, 허창환\*\*, 이상준\*\*, 김정한\*\*

## Autonomous Formation Flight Tests of Multiple UAVs

Yongkyu Song\*, Changhwan Heo\*\*, Sangjun Lee\*\* and Junghan Kim\*\*

## ABSTRACT

In this work, autonomous formation flight tests of multiple UAVs are experimentally studied. After a guidance and control system for a UAV is designed and tested, PID formation controller for follower UAV is tested using longitudinal and lateral distance feedback. It is shown that more stable and efficient formation guidance system is obtained by using position and attitude of the leader aircraft, which is exploited to calculate virtual waypoint for follower. In order to improve transient response during turn, part of roll command of the leader is added to the guidance command. Finally, autonomous formation flight test results of 3 UAVs are shown by using the best guidance algorithm suggested.

## 초 록

본 연구에서는 무인항공기의 편대비행을 위해서 먼저 단일 무인항공기의 기본적인 자세제어, 고도제어를 포함하는 유도제어시스템을 설계 제작하여 검증하고, 이 시스템을 바탕으로 먼저 선도기의 위치 정보를 이용하여 선도기와 추종기간의 앞뒤거리와 좌우 거리를 피드백하여 비례미분제어한 결과를 보여준다. 보다 안정적이고 성능이 우수한 편대비행을 위하여 선도기의 위치와 자세 정보를 이용하여 추종기가 따라가야할 가상경로점을 실시간으로 계산하고 이를 바탕으로 하여 추종기가 따라가도록 유도 명령을 생성하여 비행제어를 하고, 또한 선도기의 롤명령정보를 추종기의 최종 유도명령에 추가하여 편대비행 성능을 향상시킬 수 있음을 보여준다. 이러한 과정은 여러 가지 경우에 대한 비행시험 결과를 분석하여 알고리즘을 점차 개선하는 방식을 취했으며 다소 실험적인 방식으로 최종 편대비행 알고리즘을 확립하였다. 최종적으로 채택한 기법을 이용하여 3대의 무인항공기를 자동비행 상태에서 편대 비행을 수행한 결과를 보여준다.

**Key Words** : Formation flight(편대비행), UAV(무인항공기), Virtual waypoint(가상경로점), Flight test(비행시험)

## I. 서 론

최근 감시, 경찰, 수색, 물건 투하 등과 같은 무인항공기의 활용이 한층 증대되고 있는데 최근에 다수 무인항공기의 편대비행제어에 관한 이론 연구가 활발히 진행되고 있으나[1~8] 편대비행 시험을 수행한 연구는 많지 않다[9,10]. 하지만

†2009년 12월 16일 접수 ~ 2010년 2월 23일 심사완료

\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부

교신저자, E-mail : yksong@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

\*\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주및기계공학부 대학원

단일 무인기의 유도제어 기술을 바탕으로 각각의 무인항공기에 임무수행을 위한 탑재장비를 갖추고 다수의 무인항공기를 운용하여 상호 협력하에 임무수행을 하게 되면 임무 분담에 따른 다양성 및 효율성, 정확성 등 전략적인 장점을 갖추게 될 수 있다[10].

본 연구에서는 무인항공기의 편대비행을 위해서 먼저 단일 항공기의 기본 자세제어, 고도제어를 포함하는 유도제어시스템을 설계제작하고 시험비행을 통하여 적절성을 확인한 후, 이 시스템을 바탕으로 편대비행을 위하여 먼저 선도기(Leader UAV)의 위치 정보를 이용하여 선도기와 추종기(Follower UAV)간의 앞뒤거리와 좌우 거리를 피드백하여 비례미분제어한 결과를 보여준다. 보다 안정적이고 성능이 우수한 편대 비행을 위하여 선도기의 위치와 자세 정보를 이용하여 추종기가 따라가야할 가상경로점을 실시간으로 계산하고 이를 바탕으로하여 추종기가 따라가도록 유도 명령을 생성하여 비행제어를 하고, 또한 성능을 보다 개선시키기 위해 선도기의 롤명령정보를 일부분 추가하여 추종기의 최종 유도명령을 만들어서 비행시험한 결과 성능이 우수함을 보여준다. 이러한 과정은 2대의 무인항공기를 가지고 여러 가지 경우에 대한 비행시험 결과를 분석하여 알고리즘을 점차 개선하는 방식을 취했으며 다소 실험적인 방식으로 최종 편대비행 알고리즘을 확립하였다. 최종적으로 채택한 기법을 이용하여 3대의 무인항공기를 자동 비행 상태에서 편대 비행을 수행한 결과를 보여준다.

## II. 본 론

### 2.1 비행체 소개

Fig. 1은 편대 시험 비행에 사용된 무인항공기 3대를 보여주고 있으며, 이들은 모두 표 1의 동일한 제원을 보유하고 있다.

Table 1. The specifications of UAVs

Overall Length	2.3 m
Wingspan	2.5 m
Empty Weight	10.9 kg
Additional Payload	7.4 Kg
Engine	3W 48 cc (Gasoline)
Moment of Inertia	$I_x = 1.3, I_y = 3$ $I_z = 2.53, I_{xz} = 0.22$



Fig. 1. Research aircraft fleet

### 2.2 단일 무인항공기 유도제어

#### 2.2.1 단일 무인항공기 시스템 구성도

Fig. 2는 단일 무인항공기의 시스템 구성 및 지상통제소와의 송수신을 나타낸 것인데 지상통제소와 항공기간에는 900MHz 대역의 무선 모뎀을 이용하여 데이터 송수신을 하고 있으며, 무인항공기의 수동조종과 자동비행의 전환도 지상에서 쉽게 제어할 수 있다. 또한 900MHz 대역에서 송수신 지연, 수신단절, 수신거리축소 등과 같은 불안정할 경우를 대비하여 별도의 2.4GHz 대역을 이용하였다. 이는 900MHz 대역의 불안정할 시 지상통제소에서는 2.4GHz로 전환하여 항공기 제어신호를 송신하며 그때 항공기 내부 시스템에서 지상통제소의 사용주파수 대역에 따라 주파수를 전환시켜 주는 스위치를 만들어 무인항공기 생존성과 항공기로부터의 정보수집 안정성을 확보할 수 있게 하였다.

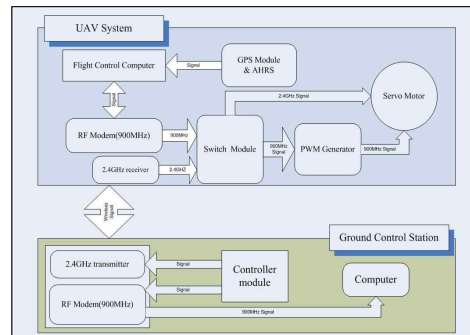


Fig. 2. Block diagram of the UAV system

#### 2.2.2 단일 무인항공기 자세 제어

무인항공기가 자율비행을 할 수 있기 위해서는 안정적인 자세제어와 고도제어가 필수적인데

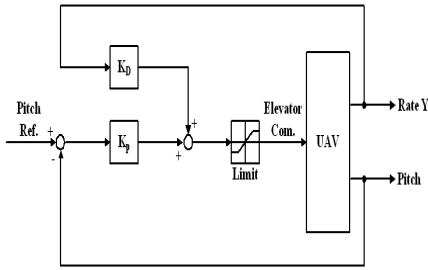


Fig. 3. Pitch Control Algorithm

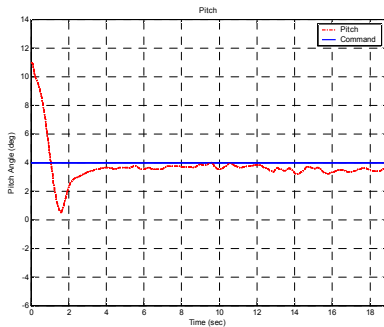


Fig. 4. Pitch Angle Control Results

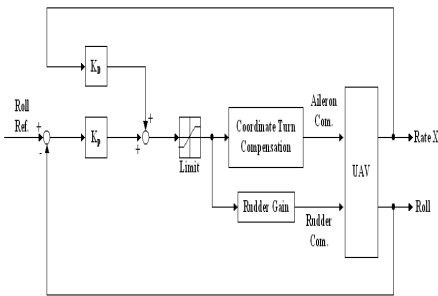


Fig. 5. Roll Control Algorithm

이를 위해 우선 PD제어기를 기반으로 무인항공기의 자세 제어 및 고도 제어 알고리즘을 구축하였으며, 완성된 무인항공기 시스템을 기반으로 구축된 제어 알고리즘의 정상 작동 여부를 실제 비행 시험을 통하여 확인하였다. Fig. 3은 항공기의 피치각의 PD제어 알고리즘을 나타낸 것이고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 단일 무인항공기 직선 자동 비행시 피치각(Pitch angle)을 4도로 유지하게 하는 비행시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5는 항공기의 롤각의 PD제어 알고리즘을 나타낸 것이고, Fig. 6은 롤각(Roll angle)을 0도로 유지하게 하여 그 결과를 나타낸

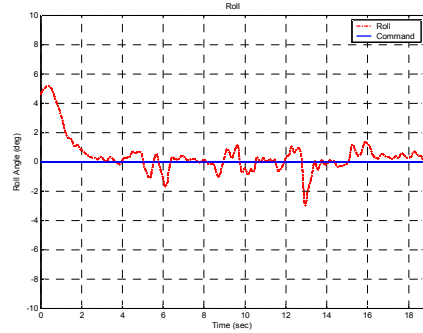


Fig. 6. Roll Angle Control Results

것이다. 모두 주어진 명령에 대하여 피치 각과 롤 각이 PD제어기 사용으로 약간의 바이어스를 나타내고 있지만 허용 범위 이내에서 만족스럽게 추종하는 것으로 확인하였다.

### 2.2.3 단일 무인항공기 고도제어

Fig. 7은 항공기의 고도를 PD제어 알고리즘을 나타낸 것이고, Fig. 8과 9는 단일 무인항공기의 고도 유지 및 선회 비행제어 결과를 도시하였는데 시험 비행시 항공기의 고도를 240m, 롤명령

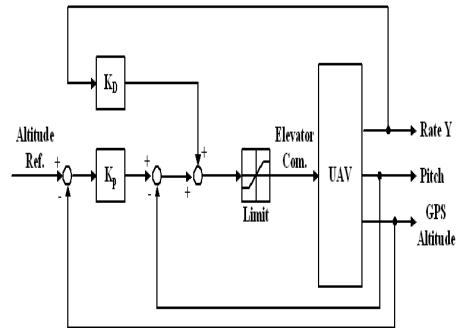


Fig. 7. Altitude Control Algorithm

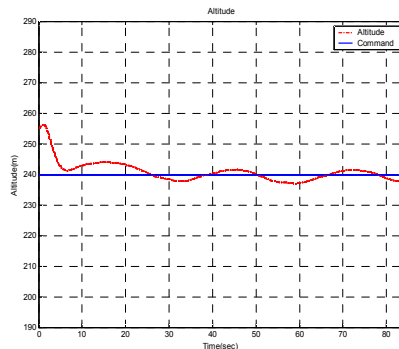


Fig. 8. Altitude Control for Turn

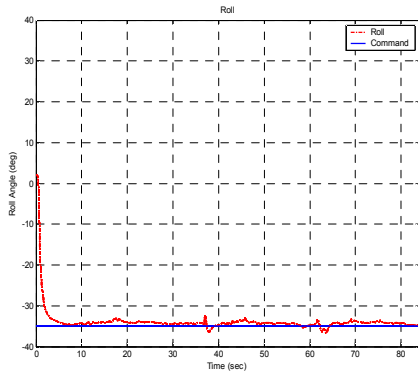


Fig. 9. Roll Angle Control for Turn

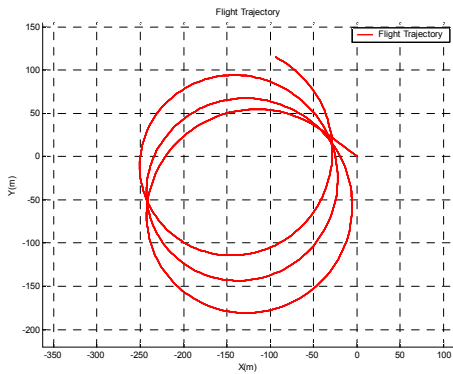


Fig. 10. Turn Flight Trajectory

각을 -35도로 유지하도록 하였을 때 허용 범위 이내에서 정상적으로 추종하는 것을 확인하였다. 그러나 Fig. 10처럼 비행경로가 결과 그래프에서 처럼 선회비행하면서 조금씩 한쪽으로 치우치는 것을 확인할 수 있는데, 이는 시험 비행시 바람의 영향으로 분석되었다.

2.2.4 단일 무인항공기 경로점 유도제어

Fig. 11은 단일 항공기의 경로점 유도제어 알고리즘을 나타낸 것이다. 이상의 비행제어시스템을 이용하여 단일 무인기의 경로점 유도제어 비행시험을 수행한 결과를 Fig. 12에 나타내었으며 Fig. 13은 각각의 경로점까지의 거리를 그래프로 도시한 것이다. 그래프에서 시간에 따라 경로점까지의 거리가 점차 작아지면서 경로점의 반경 15m 이내(Pass Condition 1) 또는 최대 45m이내(Pass Condition 2)로 통과 후, 다음 경로점까지의 거리차이가 다시 커짐을 확인할 수 있으며, 이는 이미 설정된 범위(15m) 이내의 값이므로 정상적으로 추종하는 것을 확인할 수 있다.

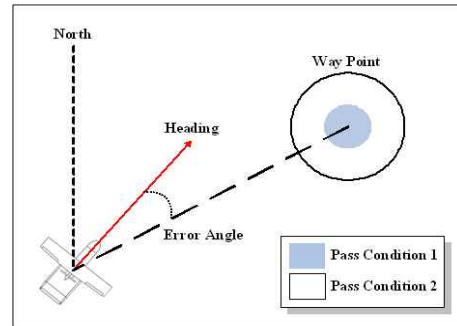


Fig. 11. 경로점 유도제어 알고리즘

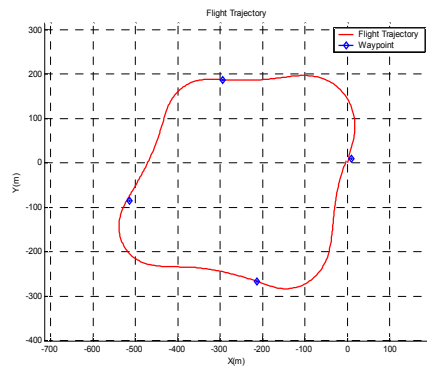


Fig. 12. Guidance Flight Trajectory Results

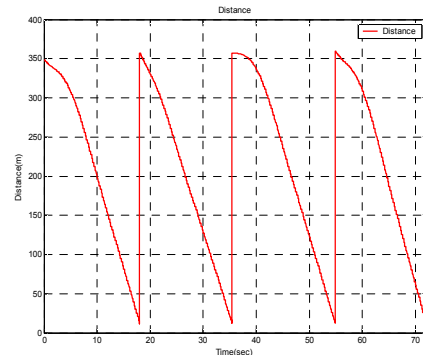


Fig. 13. Waypoint Distance Results

2.3. 다수 무인항공기 편대 비행 시험 과정

2.3.1 일반적인 PID 제어 따른 비행시험 결과

3대의 무인항공기가 편대비행 하기 위해서는 3차원 공간에서 선도기를 따라가기 위한 제어 알고리즘이 필요한데 이를 위해 아래 그림과 같이 선도기-추종기 위치에서 설정된 일정한 거리를 유지하는 것이 필요하다. 여기서는 선도기 좌표를 기준으로 거리를 나타내었으며 설정된 거리로부터의 오차와 그 미분치를 아래 식과 같이 유도

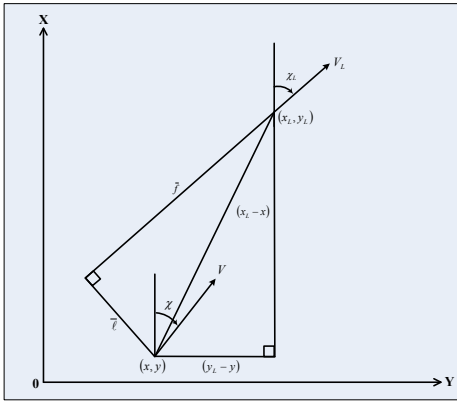


Fig. 14. Leader-Follower Geometry

하였고 이를 이용하여 유도제어 알고리즘을 적용하였다.

여기서  $V_L$ 은 선도기의 수평속도,  $V$ 는 추종기의 수평속도이며,  $f_c, l_c$ 를 각각 선도기로부터의 종방향, 측방향으로 유지해야하는 거리 명령치라 하고 그 오차를  $f = \bar{f} - f_c, l = \bar{l} - l_c$ 라 정의하면

$$\bar{f} = (x_L - x)\cos\chi_L + (y_L - y)\sin\chi_L \quad (1)$$

$$\bar{l} = (x_L - x)\sin\chi_L - (y_L - y)\cos\chi_L \quad (2)$$

이고,  $\dot{f} = \dot{\bar{f}}, \dot{l} = \dot{\bar{l}}$ 이므로

$$\dot{f} = V_L - V\cos(\chi - \chi_L) - \dot{\chi}_L \bar{l} \quad (3)$$

$$\dot{l} = V\sin(\chi - \chi_L) + \dot{\chi}_L \bar{f} \quad (4)$$

로 주어지며 이 값들을 PD제어에 사용하면 된다. 여기서  $\bar{l}$ 는 추종기가 선도기의 오른 쪽에 있을 때 양으로 정하였으므로 관성좌표계가  $\chi_L$ 만큼 회전했을 때 y좌표의 부호와는 반대가 된다[9].

### 2.3.2 PID 제어 따른 편대 비행시험 결과

우선 직선비행하고 있는 선도기를 추종기가 좌우거리  $l_c$ 와 앞뒤거리  $f_c$ 로 설정된 거리를 추종할 수 있도록 PD제어기를 적용하여 비행 시험을 수행하였다.

Fig. 15와 16은 사진 비행데이터를 기준으로  $l_c = 0m, f_c = 0m$ 을 각각 설정하여 비행시험한 결과를 나타내는데 추종기는 선도기보다 빠른 속도로 비행하여  $\bar{f}$ 과  $\bar{l}$ 가 시간이 지남에 따라 차이가 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있고, 비행시 기상악화로 인해 항공기가 자세와 위치 확인

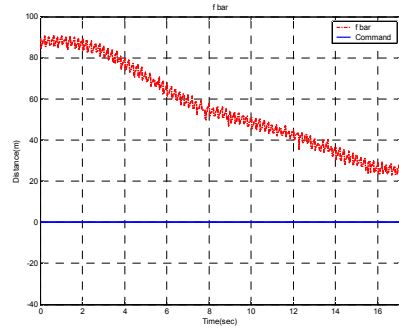


Fig. 15. Longitudinal distance ( $\bar{f}$ ) Results

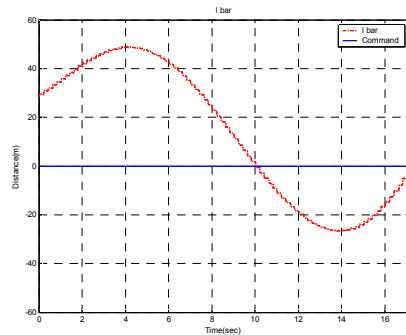


Fig. 16. Lateral distance ( $\bar{l}$ ) Results

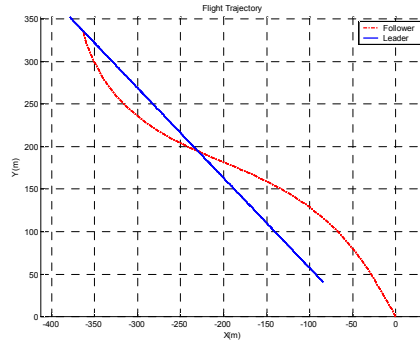


Fig. 17. Rectilinear Formation Flight trajectory Results

힘을 경우를 대비하여 자동비행구간을 짧게 설정하였다. Fig. 17은 직선비행하는 선도기를 추종기가 잘 따라가는 것을 볼 수 있다.

그러나 선도기가 곡선비행을 하게 되면 Fig. 18, 19에서처럼 선도기를 따라가지 못하고 추종기가 엉뚱한 방향으로 발산 비행하는 것을 볼 수 있는데 그 이유는 이 알고리즘이 국지적으로만 안정하고(Locally stable), 전체적으로 안정하지 못한 것 때문으로 판단된다.

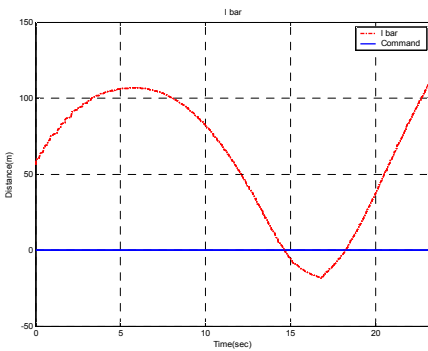


Fig. 18. Lateral distance ( $\bar{l}$ ) Results

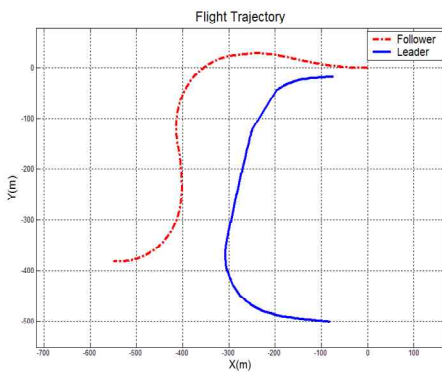


Fig. 19. Turn Formation Flight trajectory Results

2.3.3 가상 경로점 추종 알고리즘

앞절에서의 종방향 거리와 측방향거리를 피드백하여 단순 PID 제어를 이용한 편대비행 알고리즘이 국부적으로 안정하여 임의의 초기 위치로부터 편대비행을 이끌어내지 못하므로 가상 경로점을 생성하고 추종기가 그 경로점을 따라가도록 하는 알고리즘을 작성하고 편대비행을 수행하였는데 그 개념도를 Fig. 20에 나타내었다.

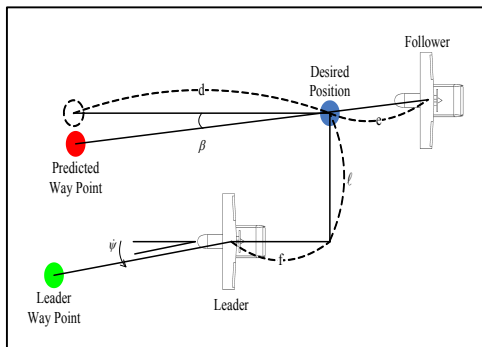


Fig. 20. 가상 경로점 추종 알고리즘 개념도

우선 추종기는 선도기의 좌표를 기준으로 앞뒤 거리  $f_c$ 와 좌우 거리  $l_c$  지점에 추종 지점을 생성하고, 추종 지점에서  $f_c$ 와 평행한 방향으로 가상 경로점을 사전에 설정된  $d$ 만큼 앞서도록 생성한다. 이는 목표지점을 곧 바로 추종해야하는 경로점으로 설정할 경우 근거리 편대비행시 상당한 오차가 날 수 있기 때문이다. 이후 추종기는 추종 지점과의 거리  $e$ 를 최소가 되도록 속도를 제어하며, 가상 경로점을 추종하기 위하여 롤각을 제어하여 추종 지점에서 비행하게 된다. 그러나 이 경우 선도기의 선회 비행시 추종 반응이 좋지 않기 때문에 선도기의 요 각속도에 비례하여  $\beta$ 각 만큼 이동된 지점에 가상 경로점을 생성하는 것이 과도응답을 줄이는데 유용하다. 또한 추가로 선도기의 급격한 선회 비행에 대비하여 추종기는 선도기에서 생성되는 롤제어 명령을 수신하여 추종기 롤제어 명령에 일정 비율로 섞여 추종기의 최종 롤제어 명령을 생성하게 된다. 즉,

$$\phi_c = LOS(\vec{R}_f, \vec{R}_d) + \lambda \phi_{LC} \tag{5}$$

로 주어지는데 여기서  $LOS(\vec{R}_f, \vec{R}_d)$ 는 추종기 위치  $\vec{R}_f$ 와 추종기가 따라가야 하는 가상경로점  $\vec{R}_d$ 에 따른 시선각오차 유도명령치이며,  $\phi_{LC}$ 는 선도기의 롤명령치인데  $\vec{R}_d$ 는 앞의 알고리즘에 의해

$$\vec{R}_d = \vec{R}_L + f_c \vec{i}_L + l_c \vec{j}_L + d(\cos(\beta + \dot{\psi}_L \Delta t) \vec{i}_L + \sin(\beta + \dot{\psi}_L \Delta t) \vec{j}_L) \tag{6}$$

로 계산된다.

아래에서는 위에서 언급한 예측거리  $d$ , 가상 경로점 생성시 헤딩각  $\beta$ 보정, 추종기 롤명령 생성시 선도기의 롤명령치 조합비율에 따른 비행시험 결과를 보여준다.

2.3.4 가상 경로점 생성시  $\beta$ 각 보정에 따른 편대비행 시험 결과

이전의 선도기와 추종기 간의 앞뒤 거리와 좌우 거리 조절 방식인 알고리즘으로 발생한 문제를 해결하기 위해 선도기의 위치와 Heading을 기준으로 가상 경로점을 생성하여 추종기가 비행하는 알고리즘을 적용하였다. 이 경우 추종 가상 경로점을 생성할 때 선도기의 Heading 각속도 방향으로 경로점을 보정하는 방안을 고려하게 되었고, 이를 실험한 결과를 Fig. 21과 22의 그래프처럼 보정한 경우와 보정이 되지 않은 경우의 결과들을 나타내었다.

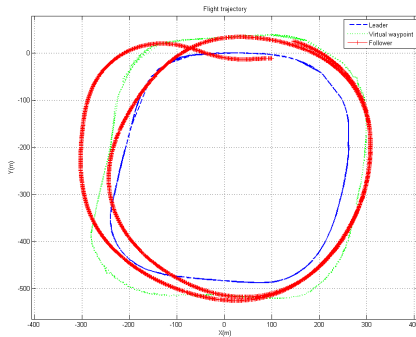


Fig. 21. Heading 미보정시의 Formation Flight

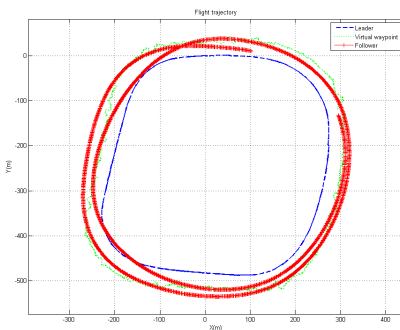


Fig. 22. Heading 보정시의 Formation Flight

Fig. 21은 Heading을 보정하지 않은 경우를 시험 비행한 결과 나타낸 그래프이다. 그래프에서 추종기는 생성되는 가상 경로점을 어느 정도 추종 하지만 추종기가 가상 경로점을 추종하는데 있어 측방향 오차를 가지고 추종하게 되어 추종 거리를 줄이지 못한 것으로 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 22는 선도기의 Heading을 보정한 경우 시험 비행한 결과 나타낸 것인데 이 경우 보정하니 않은 경우 보다 가상 경로점을 더 잘 추종하는 것을 확인할 수 있었지만 가상 경로점 생성 위치가 선도기의 Heading변화에 민감하게 반응하여 빈번하게 좌우로 흔들리는 것이 확인되어 이 실험 결과를 바탕으로 Heading 보정 Gain을 작은 값으로 설정하여 사용하였다.

2.3.5 가상 경로점 생성 예측거리 d에 따른 편대 비행 결과

앞서 적용한 알고리즘과 함께 가상 경로점 생성 예측거리 d에 따른 편대 비행의 결과를 확인하는 시험비행을 여러 가지 경우에 대해 수행하였다. 가상 경로점까지의 거리 d를 60~80m까지 변화를 주면서 추종기의 추종 결과를 나타내었다. 이때 항공기간의 앞뒤거리는 15m, 좌우거리

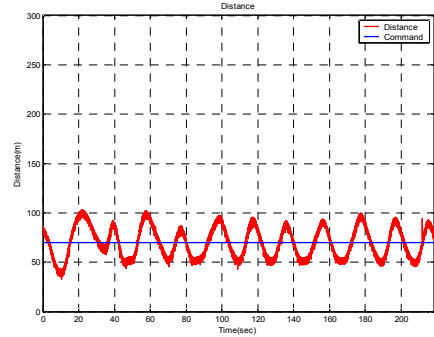


Fig. 23. 가상경로점 예측거리 d=60m 일때 선도기와의 거리 편차

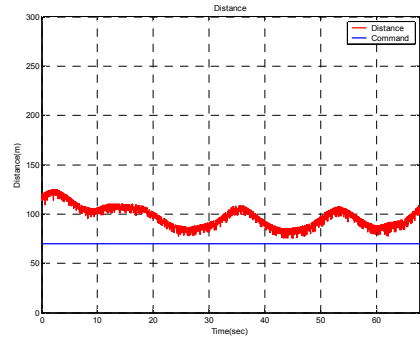


Fig. 24. 가상경로점 예측거리 d=70m 일때 선도기와의 거리 편차

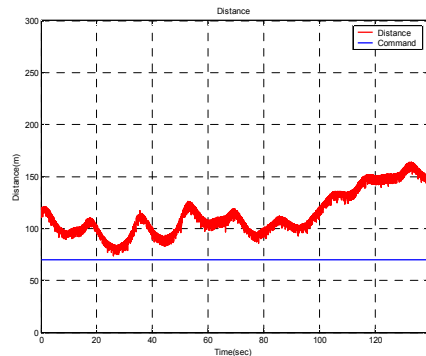


Fig. 25. 가상경로점 예측거리 d=80m 일때 선도기와의 거리 편차

는 30m로 설정하였다. Fig. 23, 24, 25는 가상 경로점 생성거리를 60m, 70m, 80m 앞에 생성하여 편대 비행을 시험한 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 가상경로점을 60m 앞에 설정할 때 가장 좋은 추종이 이루어지는 것으로 볼 수 있다.

2.3.6 선도기의 롤명령을 이용한 편대 비행 결과

앞의 유도알고리즘을 이용할 경우 직선 비행 구간에서는 추종을 잘하지만 선회비행시 추종기의 과도응답으로 인해 Fig. 19와 같이 추종이 늦는 것을 알 수 있는데, 여기서 더 정확하고 효율적인 추종기의 추종 성능을 향상하기 위하여 선도기의 롤명령을 추종기의 가상 경로점 유도에 의한 롤명령에 일정한 비율로 추가하여 추종기의 최종 롤명령으로 입력하는 알고리즘을 적용하였다. 즉 추종기의 최종 롤명령치는

$$\phi_c = LOS(\vec{R}_f, \vec{R}_d) + 0.7\phi_{LC} \quad (7)$$

로 설정하였다.

이상의 유도 명령치를 제공하는 알고리즘을 적용하여 비행시험을 하였으며 그 결과를 Fig. 26, 27, 28에 나타내었는데 선도기의 롤명령치의 50%를 추종기에 추가한 경우에는 선회시에 과도응답으로 인해 궤적이 추종기의 속도변화에 따라 빛나는 경향이 있으며, 70%를 추가한 경우에는 선회시 추종기의 속도변화에도 적절하게 잘

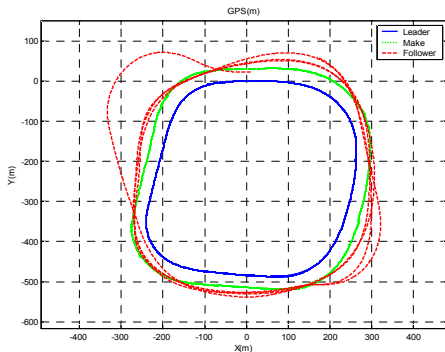


Fig. 26. 선도기의 롤명령치를 50% 추가한 경우

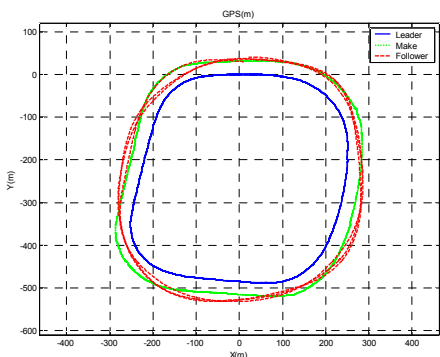


Fig. 27. 선도기의 롤명령치를 70% 추가한 경우

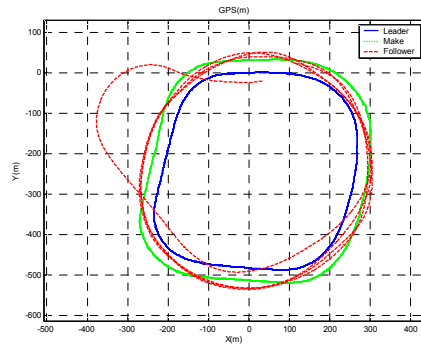


Fig. 28. 선도기의 롤명령치를 90% 추가한 경우

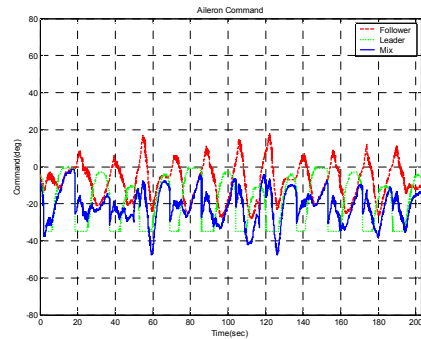


Fig. 29. Roll Commands (70%)

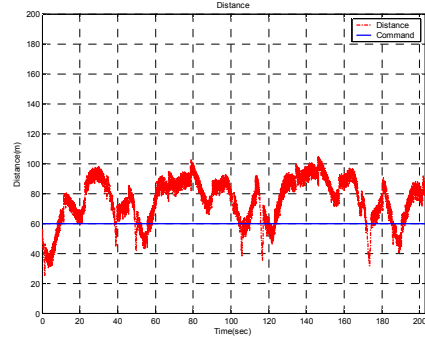


Fig. 30. 가상 경로점(60m)까지의 거리편차

따라가는 것을 볼 수 있고, 90%를 추가한 경우에는 선도기의 롤명령치가 많이 반영되어 추종기의 속도변화에도 궤적이 앞질러 가는 것을 볼 수 있다. 그에 따른 추종기의 최종 롤명령(Mix로 표시)을 Fig. 29에, 가상 경로점과의 거리편차를 Fig. 30에 나타내었다.

2.4. 무인항공기 3대의 편대 비행 시험 결과

각각의 시험비행으로 얻어진 결과를 종합하여 제어기 설정에 반영하여 3대의 무인항공기(선도



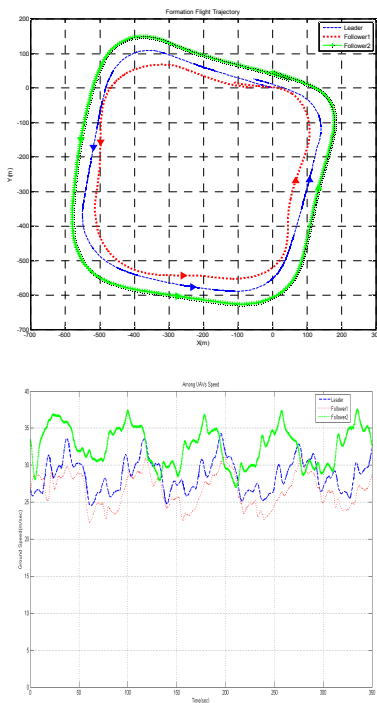


Fig. 32. 무인항공기 3대의 속도 비교



Fig. 33. 자동 편대비행하는 3대의 무인항공기

기 1대, 추종기 2대)를 이용하여 실시한 결과를 아래와 같이 그래프로 나타내었다. 최종적으로 선택한 유도제어 알고리즘은 먼저 예측거리  $d=60m$ 에 선도기의 요각속도를 20% 반영하여 가상경로점을 생성하고, 그 가상경로점을 추종기가 따라가도록 유도명령을 계산하고 그 유도명령에 선도기의 롤명령치의 70%를 추가하여 추종기의 최종 롤명령치로 설정하여 편대비행을 하였으며 그 결과를 Fig. 29, 30에 나타내었다. 비행은 먼저 선도기를 수동으로 이륙시켜 자동비행으로 전환하여 경로점을 자동비행하게 한 후, 우측 추종기를 이륙시켜 선도기 근처에서 편대비행 알고리

즘을 작동시키고, 좌측 추종기도 마찬가지로 방법으로 선도기 근처에서 편대비행 모드를 작동시킨 것이다. 추종기를 편대에 진입시킬 때 추종기는 선도기로부터 어느 정도 거리가 떨어져도 상관 없으나 과도기간이 좀 더 걸릴 뿐이며 Fig. 31, 32는 정상상태에 도달한 후의 궤적을 나타낸다. Fig. 31은 무인항공기 3대의 비행궤적을 나타내며 삼각형으로 표시한 것은 동시각의 위치를 나타낸 것이다. 중앙선이 선도기의 궤적이며 우측 추종기는 선도기를 상당히 잘 따라가는 것을 볼 수 있고, 좌측 추종기는 선회비행시 약간의 과도 응답이 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 유도 명령뿐만 아니라 추종기의 추력제어를 포함하는 종합적인 결과이다. Fig. 32는 무인항공기 3대의 GPS 속력을 나타낸 것인데 바깥쪽 추종기의 속력은 선도기보다 빠르게 유지되고, 안쪽 추종기는 선도기보다 느리게 유지되는 것을 알 수 있다. Fig. 33은 3대의 무인기가 편대비행하는 모습이다.

### III. 결 론

편대 비행을 위한 단일 무인항공기의 자세제어, 고도제어, 경로점 유도제어 비행제어시스템을 구축하여 검증하고, 3대의 무인항공기가 자동으로 편대비행하는 시험을 여러 가지 알고리즘을 이용하여 수행한 바, 선도기의 위치와 요각속도 정보를 이용하여 추종기가 따라가야 하는 가상경로점을 실시간으로 예측생성하고 또한 선도기의 롤명령치를 적절히 이용하여 추종기를 제어하는 것이 유효함을 비행시험을 통해 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 한국항공대학교 교비 특별연구지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- 1) 서중보, 안채익, 김유단, “리더가 없는 방식의 다수 무인기 편대비행 제어와 안정성 해석”, 한국항공우주학회지 제36권 제10호, 2008. 10. pp. 988-995
- 2) 김도명, 김덕렬, 남수현, 석진영, “무인항공기 편대비행을 위한 수정된 비선형 유도법칙”, 한국항공우주학회 2007년도 추계학술발표회 논문집(II), 2007. 11., pp. 1134-1137

3) 정보경, 김유단, “무인항공기의 편대비행 유도기법 연구”, 한국항공우주학회 2006년도 추계 학술발표회 논문집, 2006. 4., pp. 748-751.

4) J. R. T. Lawton, R.W. Beard, and B. J. Young, “A Decentralized Approach to Formation Maneuvers”, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol. 19, No. 6, 2003, pp. 933-941.

5) F. Giulietti, L. Pollini, and M. Innocenti, “Formation Flight Control : A Behavioral Approach”, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Canada, August 2001.

7) P. Binetti, K. B. Ariyur, M. Krstic, and F. Bernelli, “Formation Flight Optimization Using Extremum Seeking Feedback”, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol.26, No.1, 2003, pp. 132-142.

8) M. Pachter, J. J. D’Azzo, and A. W. Proud, “Tight Formation Flight Control”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 24, No. 2, 2001, pp. 246-254.

9) Y. Gu, B. Seanor, G. Campa, M. R. Napolitano, L. Rowe, S. Gururajan, and S. Wan, “Design and Flight Testing Evaluation of Formation Control Laws”, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 14., No. 6, Nov. 2006, pp. 1105-1112.

10) N. Li and H. Liu, “Multiple UAVs formation flight experiments using Virtual Structure and Motion Synchronization”, AIAA 2009-5887, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Aug. 2009, Chicago, Illinois, USA