

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(12), 1039-1047(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.12.1039

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

## 무선네트워크 비행제어시스템을 탑재한 무인항공기의 시험개발

오형석\*, 김병욱\*, 이시훈\*, 노원호\*, 강승은\*, 고상호\*\*

Test development of a UAV equipped with  
a Fly-By-Wireless flight control systemHyung Suk Oh\*, Byung Wook Kim\*, Si Hun Lee\*, Won Ho Nho\*, Seung Eun Kang\*  
and Sang Ho Ko\*\*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University\* ,\*\*

## ABSTRACT

This paper presents a test development of a Fly-By-Wireless flight control system for a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV). Fly-By-Wireless system (FBWLS) refers to a system that uses a wireless network instead of a wired network to connect sensors and actuators with a flight control computer (FCC), reducing considerable amount of wires. FBWLS enables to design a much lighter aircraft along with decreased maintenance time and cost. In this research we developed a Zigbee-based FBWLS UAV in which sensors (GPS and AHRS) are wirelessly connected via a FCC to aileron and elevator servo motors. In order to see the effect of time delay due to wireless signal on the flight stability of the UAV, several flight tests were conducted. From the tests, it was confirmed that the effect is minor by comparing the flight response of the FBWLS with the corresponding Fly-By-Wire system.

## 초 록

본 논문은 무선네트워크를 사용하는 비행제어시스템을 탑재한 고정익 무인항공기의 시험개발에 대해 소개한다. 무선네트워크를 기반으로 하는 항공기는 기존의 방식과 달리 센서와 구동기를 무선으로 연결하여 전선의 무게를 줄여 항공기를 경량화 할 수 있고, 이에 따라 기체 정비비용과 시간을 절약할 수 있다. 본 연구에서 사용된 무인항공기는 AHRS와 GPS, 엘리베이터와 에일러론을 구동하는 서보모터가 ZigBee 통신을 이용하여 FCC에 연결되었다. 또한 무선신호에 의한 지연이 비행안전성에 미치는 영향을 알아보고자 실내 및 비행시험을 수행하였으며, 유선비행제어시스템과의 결과 비교를 통해 이러한 영향은 매우 미미했음을 확인하였다.

**Key Words :** Fly-By-Wireless(무선 네트워크 비행제어 시스템), Networked Control Systems(네트워크 제어 시스템), Autonomous Flight(자동비행), Flight Control System(비행제어 시스템)

† Received : May 18, 2017      Revised : November 10, 2017      Accepted : November 20, 2017

\*\* Corresponding author, E-mail : sanghoko@kau.ac.kr

## I. 서 론

최근 무선네트워크의 발달로 인해 제어공학 분야에서도 무선네트워크를 활용한 사례가 증가하고 있다. Networked Control Systems(NCSs)는 기존의 시스템과 비교하여 시스템의 구조에 유연성을 가져오며, 설치 및 유지 보수비용을 감소시키는 등의 장점이 있다. 이를 활용하여 NCSs는 하위 시스템들을 무선네트워크로 연결하여 군집 시스템을 제어하는데 이용된다. 도로 교통 통제, 자동화 (Automated Highway Systems) 및 무인기의 원격 제어 등이 NCSs의 활용 예이다[1].

NCSs의 또다른 활용 방안으로 시스템 내부의 신호 전달 체계를 무선네트워크로 대체하는 방법이 제시될 수 있다. 현대의 제어 시스템은 센서 및 구동기의 수가 증가하게 되면서 이들의 신호를 전달하기 위한 전선의 수도 급증하게 되었다. 또한, 전선들은 시스템의 물리적인 크기가 증가하는 경우 시스템의 구성 요소들을 연결하는 전선의 길이도 증가하므로 시스템 전체의 무게 및 유지·보수비용의 증가를 유발하며 시스템의 고장 및 파괴의 주요 원인이 되기도 한다. 일례로 Fly-By-Wire(FBW)가 적용된 B747 항공기가 연료 탱크 위를 지나는 전선에서 합선이 발생하여 항공기가 폭발, 추락하는 사고가 발생하기도 했다 [2]. 그러므로, 기존의 유선방식의 신호 전달 방식대신 무선네트워크를 활용할 경우 위에서 언급한 문제의 원인인 전선을 대폭 제거할 수 있어 시스템의 제작비용을 감소시키고 안정성은 증가하는 효과를 기대할 수 있다.

하지만, 신호를 전달하기 위해 무선네트워크를 사용하기 때문에 기존의 제어시스템과 달리 무선 통신에서 발생하는 여러 현상들에 대한 대비가 필요하다. 제한된 전송속도, 샘플링, 그리고 데이터 송·수신으로 인해 발생하는 시간지연 등이 NCSs에서 발생할 수 있는 문제점이다. 이를 보완하기 위한 방법으로 여러 개의 동일한 센서를 사용하거나, 손실된 센서 값을 추정하는 방법 등이 연구되고 있다[3-4].

본 논문에서는 NCSs를 시스템 내부에서 활용하는 방법으로 기존 항공기의 FBW에 NCSs를 적용한 Fly-By-Wireless System(FBWLs)를 제안한다. FBWLs는 전기적 제어 신호를 전선을 사용하여 전달하던 FBW와 달리 무선 네트워크를 통한 전달로 대체한 시스템이다.

선행 연구로 Bluetooth 프로토콜을 사용한 FBWLs 무인 항공기에 대한 개념이 포르투갈의 Minho 대학에서 제시되었으며[5], 이 연구에서는 노드의 수가 증가로 발생하는 시간 지연과 무선

통신에 의한 데이터의 손실이 FBWLs의 문제점이 제시되었다.

본 연구에서는 NCSs의 활용 가능성을 FBWLs를 통해 검증하고자한다. ZigBee 프로토콜을 사용하는 XBee RF 모듈을 사용하여 FBWLs를 구축하고, 이를 탑재한 무인 항공기의 비행 실험을 통해 무선 통신에 의한 시간 지연 및 데이터 손실이 항공기의 제어 시스템에 미치는 영향을 확인하고자한다.

## II. 본 론

### 2.1 FBWLs 개요

일반적인 FBWS는 비행제어컴퓨터(Flight Control Computer, FCC), 센서류, 구동기 등으로 구성된다. 이러한 FBWS에서 중앙 처리 장치 (Main Control Unit, MCU)와 센서 및 구동기 간의 신호들은 전선을 통해 전달되는데, 이러한 유선 통신들을 무선 통신으로 대체하는 것이 FBWLs의 기본 개념이다. 해당 시스템의 개념을 Fig. 1에 나타내었다.

### 2.2 무선 통신 모듈의 선정

#### 2.2.1 무선 네트워크 시스템 규격의 선정

현대에는 무선 통신 주파수로 2.4GHz대역이 가장 많이 사용된다. 이에 따라, FBWLs에 사용될 프로토콜의 후보군으로 2.4GHz에서 많이 사용되는 ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi가 고려될 수 있다.

FBWLs에 사용할 무선 통신 규격은 먼저 신뢰성이 확보되어야 한다. ZigBee를 포함한 세 통신 규격 모두 어느 정도의 잡파 혼선에 대응할 능력을 가지고 있다. 이들의 통신방식을 표로 정리하면 Table 1과 같다[6].

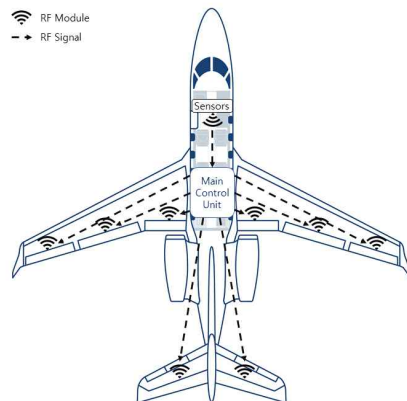


Fig. 1. Concept of FBWLs[1]

**Table 1. Spreading Systems of Wireless Protocols**

Protocol	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
Spreading	DSSS	FHSS	DSSS

**Table 2. Maximum Number of Nodes**

Protocol	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
Max nodes	65535	8	50

**Table 3. Range of Wireless Protocol at Line of Sight**

	ZigBee	Bluetooth	Wi-Fi
Range	~100m	~30m	~50m

Direct-sequence spread spectrum(DSSS)방식은 spreading spectrum band내의 주파수 혼선에 강한 특성을 가지고 있고, Frequency-hopping spread spectrum(FHSS)는 전 영역의 주파수 혼선에 강건하다[7]. 높은 고도에서 순항하는 비행기와 같은 경우에는 다른 잡파의 세기가 강하지 않기 때문에 DSSS방식이 유리하다.

한 가지 더 고려해야할 점은 출력의 세기이다. 전형적인 ZigBee방식의 송신기는 0dBm의 출력을 내지만 Wi-Fi, Bluetooth방식은 10~25dBm의 출력을 내기 때문에 ZigBee방식의 송신기가 세기에 의한 전파 혼선의 가능성이 낮다. 또한, 항공기에서 사용되는 센서와 구동기의 개수는 지속적으로 늘어나는 추세[8]이며, 안전을 위해 이중화, 삼중화를 고려할 경우 작동되어야 할 무선 모듈의 수가 늘어나게 된다. 그러므로 통신방식에 따라 모듈에서 수신할 수 있는 노드가 많아야 실제로 사용이 가능하다. 세 가지 프로토콜의 가용 노드 수를 Table 2에 나타냈다.

Table 2에 따르면, ZigBee 프로토콜의 경우 가장 많은 노드를 사용할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 항공기는 전력이 제한되어 있으므로, 무선 통신에 의한 전력 소비 역시 고려해야 할 사항이다. 일반적으로 Bluetooth의 배터리수명은 달 단위, Wi-Fi는 일 단위인데 비해, ZigBee의 수명은 년 단위로 알려져 있다[6].

통신거리 역시 중요하다. 대형 항공기의 규모를 감안할 경우 충분한 통신 거리가 보장되어야 하며, 각 프로토콜의 통신거리를 Table 3에 정리했다[6].

Table 1-3의 자료들로 판단할 경우 ZigBee 프로토콜이 나머지 두 가지 방식보다 항공기에서 사용되기 적합함을 알 수 있으며, ZigBee 프로토콜을 사용하는 XBee라는 RF모듈의 토폴로지는

선정하고 FBWLS에 적용이 가능한지 판단하기 위해 데이터 손실과 시간 지연을 측정하였다.

**2.2.2 ZigBee 네트워크 토폴로지**

ZigBee 네트워크 토폴로지는 Coordinator, Router, End Device로 구성되며 Coordinator는 고유 네트워크를 개설하고 관리하며 Router는 네트워크에 참여하여 통신을 중계함으로써 전송 범위를 넓히는 역할이며 End Device는 부모 노드들과 통신할 수 있다.

각각의 토폴로지는 부모와 자식노드로 구성된 Star 토폴로지, Router를 이용하여 네트워크를 크게 한 Tree 토폴로지, Router간에도 신호를 중계하며 특정 Router가 손상되더라도 다른 Router를 경유하게 하여 네트워크의 기능을 유지하는 Mesh 토폴로지가 있으며 Fig. 2와 같다[9-10].

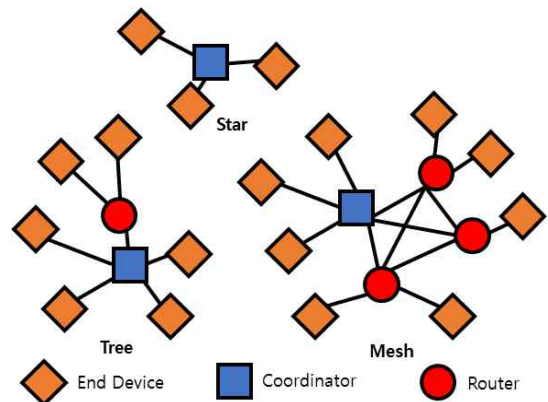
본 논문에서 사용한 XBee S1은 Star, Tree 토폴로지를 지원한다. 센서, 구동기, FCC 노드로 구성된 네트워크의 물리적인 크기를 고려하여 Star 토폴로지를 사용했다.

**2.2.3 ZigBee의 무선 데이터 손실을 측정**

항공기의 데이터가 무선으로 전송 중 손실 될 경우 시스템 자체의 손상을 야기할 수 있다. 그러므로 데이터의 무선 전송 손실은 반드시 확인하고 넘어가야할 사항이다.

무선 데이터의 손실률을 확인하기 위해 Zigbee 통신을 사용하여 전송속도 115200bps로 GPS와 AHRS가 각각 5Hz, 50Hz로 FCC에 센서 데이터를 전송하게 했다. 이때, 데이터의 손실은 발생하지 않았다.

무선 송수신 데이터의 손실량이 적은 원인은 ZigBee 장치인 XBee의 프로토콜에 의한 것으로 추정된다. 해당 장치는 수신자가 송신 데이터에 대한 답신인 ACK를 보내어 수신확인을 하며 송신자



**Fig. 2. Network Topology**

가 ACK를 받지 못했을 경우, 최대 3번의 재송신을 하여 데이터의 손실을 최소화 방지한다. 이를 통해 무선 데이터 손실률에 대해서 ZigBee의 안정성을 확인하였다.

**2.2.4 ZigBee의 시간지연**

실험에 사용한 FCC에서 센서 값을 받기부터 제어 명령을 출력하는데 약 1~2ms 가 걸리는 것을 확인하였다. 또한 ZigBee의 시간지연은 4ms로 알려져 있는데[11], 무선 장치간의 거리로 인한 시간 지연은 통신거리 2m까지 일정 거리에서 Fig. 3과 같이 신호의 시간차를 측정했을 때, 전송속도 115200bps에서 1 주기 전송량이 11byte, 송신 주기가 50Hz일 때 시간지연은 약 4.5ms였다. 이를 토대로 데이터 수신 상황이 좋지 않아 ACK에 의한 3회의 재송신을 수행할 경우 약 20ms의 지연이 발생함을 알 수 있다.

FCC - 서보 간의 명령 프로토콜은 각 서보모터에 대한 명령각과 전송 데이터에 대한 검사합을 포함하여 4개의 서보에 대해서 1회 송신에 총 11byte로 데이터 전송량은 4400bps, 전송속도 115200bps에서 주기 당 0.764ms의 송수신 시간이 사용된다. 따라서, 본 시스템에서는 센서로부터 입력된 상태 정보로부터 제어신호가 서보에 전달되기까지 12 ~ 30ms의 시간지연이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

**2.3 FBWLS 구현**

본 논문에서는 무인비행 기능을 추가한 모형 항공기에 ZigBee를 사용하여 FBWLS를 개발했다. 항공기에는 센서로 AHRS와 GPS가 탑재되어 있으며, 구동기로는 서보모터로 작동되는 에일러론, 엘리베이터, 러더, 스티어링 노즈기어가 있다. 이들 중 에일러론과 엘리베이터에 할당된 서보모터를 무선화 하여 FBWLS를 구축했다. 또한, 유사시를 대비하여 항공기의 제어권 및 신호 전달

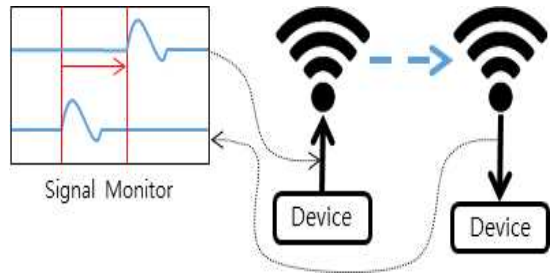


Fig. 4. Method for Time Delay Measurement

Table 4. Specification of UAV

Wing Span	1.8m
Wing Area	60.6dm <sup>2</sup>
Length	1.6m
Weight	4.9kg
Thrust	5.1kg

Table 5. Specification of Equipments

	List	Remarks
FCC	Beagle Bone Black Board	system clock 1GHz
AHRS	Microstrain 3DM-GX4-45	update rate 50Hz
IMU	withrobot MyARHS+	update rate 50Hz
GPS	MT 3339	5Hz
RF Module	XBee-PRO s1	Frequency band 2.4GHz
UAV	Kyosho Calmato 60	Wing Span 1.8m
Actuator	RC Servo	Standard Servo

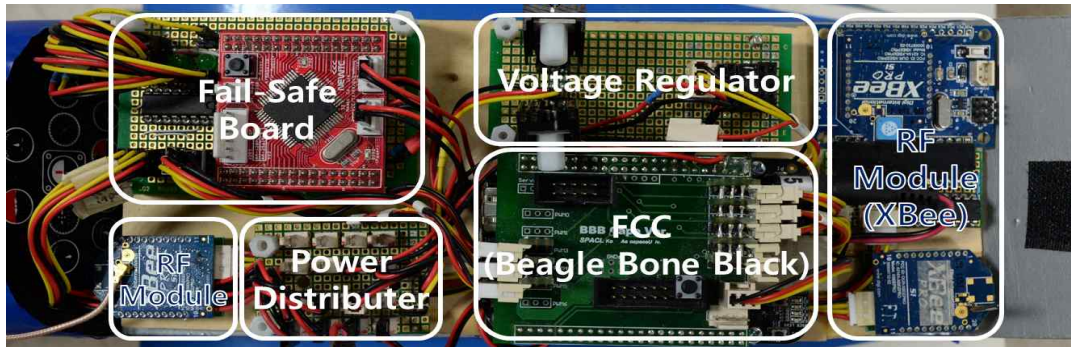


Fig. 3. Main Control Unit of UAV





Fig. 5. FBWLS Integrated UAV

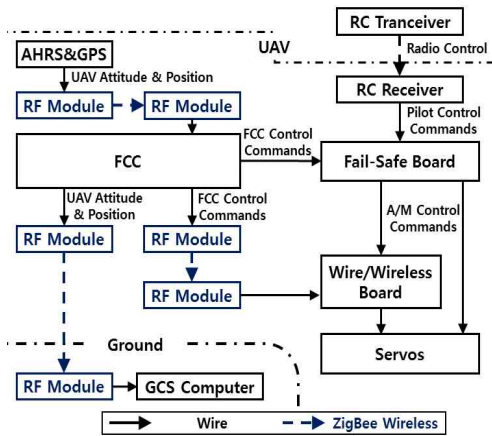


Fig. 6. Interfaces Configuration of FCS

방식을 각각 조종사와 FCC, FBWS와 FBWLS로 선택할 수 있도록 Fail-Safe Board를 추가했다.

FBWLS를 구현하기 위해 AHRS와 GPS를 한 쌍의 ZigBee 모듈을 사용하여 무선으로 연결하였고, 엘리베이터와 에일러론 서보도 각각 한 쌍의 ZigBee 모듈을 사용하여 총 6개의 ZigBee 모듈이 탑재되었으며, 지상과의 통신을 위한 RF 모듈도 ZigBee를 사용하였다.

구현된 시스템의 개념도와 실물 사진, 기자재의 사양 등을 Fig. 4-6 및 Table 4-5에 나타냈다.

## 2.4 비행시험

FBWLS의 안정성을 확인하기 위해 FBWLS가 탑재된 무인항공기를 이용해 비행시험을 진행했다. 신호 전달방식이 FBWS일 때와 FBWLS일 때를 비교하여 두 시스템의 응답 차이를 분석했다.

### 2.4.1 FBWLS에서의 제어기 안정성 확인

무선송수신에는 약간의 시간지연이 발생하는데, 이러한 요소가 항공기의 제어기에 미치는 영향을 확인할 필요가 있다.

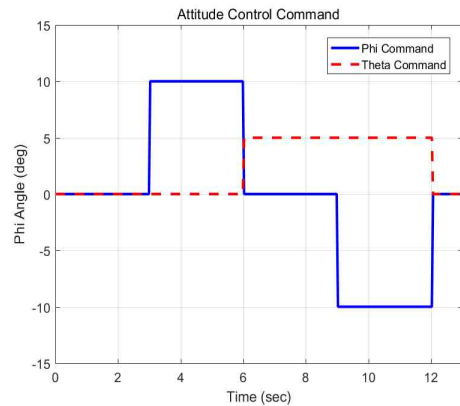


Fig. 7. Attitude Control Command

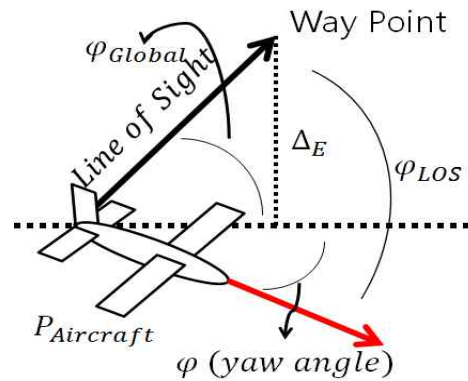


Fig. 8. Definition of LOS Angle

이에 따라, 항공기에 탑재한 Roll 및 Pitch 자세 제어를 탑재하여 FBWS와 FBWLS로 작동될 때의 응답을 비교하는 비행 실험을 진행했다. 제어기의 제어 명령은 Roll과 Pitch 각도가 3초 간격으로 변화하도록 주어지며, 총 12초 동안 유지된다. 자세 제어 명령의 변화는 Fig. 7과 같다.

조종사에 의한 수동 비행 도중 제어를 작동시켜 제어기에 의한 제어 응답을 확인했다.

### 2.4.2 시선각 유도 항법 비행[12-13]

2.4.1의 실험으로 FBWLS의 제어기가 문제없이 작동함이 확인되어, 항공기에 시선각 유도 항법 제어를 탑재하여 무인 비행을 시행했다.

FCC에 경로점(Way Point)를 입력한 후, FBWLS를 사용한 비행에서도 항공기가 이상 없이 입력된 경로점을 추종하는지 확인했다.

### 2.4.3 데이터 손실 측정

비행 중에도 지상에서와 같이 무선으로 전송되는 데이터의 손실 여부를 확인하기 위해 항공기의 GPS 및 AHRS로부터 FCC에 전송되는 데

이더를 유선과 무선으로 동시에 저장하여 두 데이터의 일치성을 확인하여 데이터의 손실 여부를 확인했다.

### 2.5 비행 시험 결과 및 분석

70회 이상의 비행시험을 진행하였으며 그중 같은 자세제어 명령이 입력된 5회씩의 FBWS와 FBWLS를 사용한 비행 시험 결과를 나타내었다.

#### 2.5.1 비행 중 무선 데이터 손실

비행 중 데이터를 무선으로 송신하는 도중에 발생하는 손실률을 측정했다. 지상에서 실험할 때와 같은 조건으로 구동부는 전송속도 115200bps, 전송주기 50Hz, 주기 당 11Byte의 데이터를 전송하였다. 센서부는 GPS와 AHRS를 사용하여 전송속도 115200bps, 각각 전송주기 5Hz, 50Hz, 주기 당 약 141 Byte, 30 Byte의 데이터를 전송하였으며, 측정 결과를 Table 6에 정리했다.

지상에서의 실험과 마찬가지로 센서부는 무선 송수신으로 인한 데이터 손실은 발생하지 않았으나 구동부에서는 시스템으로의 영향은 미미하지만 일부 데이터의 손실이 발생했다.

적은 데이터 손실은 앞의 2.2.3에서 언급한 XBee의 데이터 수신 확인 방식이 효과적으로 작동하여 데이터의 손실을 최소화하고 있음을 알 수 있다.

구동부에서 발생한 데이터 손실은 각 XBee 안테나의 종류와 장착 형태에 따라 기인하는 것으로 사료된다. 센서부의 XBee 안테나는 다이폴 안테나를 사용하였으며 안테나를 평행하게 배치하여 송수신 강도를 극대화 할 수 있게 하였으나, 구동부 모듈은 협소한 내부 탑재공간으로 인해 XBee 안테나를 송신부를 다이폴 안테나, 수신부 PCB 안테나를 사용하였다. PCB 안테나는 상대적으로 안테나 수신 감도가 낮으며 같은 전력 소모에 대해 송신 효율이 또한 낮다. 또한 구동기 송신부로부터 엘리베이터 구동부와 에일러론 구동부의 거리가 다르며 거리가 먼 구동부의 손실률이 더 높은 것을 확인하였다.

#### 2.5.2 FBWL, FBW 응답 비교

제어기에 의한 제어 응답과 에일러론과 엘리베이터의 움직임을 FBWS와 FBWLS로 나누어서 그래프로 나타내었다. Response 1회당 1회의 자세 제어 구동을 나타내며, 실선은 제어 응답을 나타내고, 흑색 점선은 제어 명령을 나타낸다. 또한, 양의 값을 갖는 에일러론 입력은 좌측(음수) 방향으로의 톨을 발생시키며, 음의 값을 갖는 엘리베이터는 고개를 드는 피치업(양수) 모멘트를 발생시킨다.

Table 6. Inspection of Packet Loss

Test 1 : Wireless actuator			
	Total data	Total loss	Loss rate
Elevator	≈ 24 KB	561 B	2.34 %
Aileron	≈ 24 KB	209 B	0.87 %
Test 2 : Wireless sensor			
AHRS	≈ 1 MB	0 B	0 %
GPS	≈ 2 MB	0 B	0 %

먼저 FBWS와 FBWLS에 의한 톨 제어 응답과 조종면 제어 명령을 Fig. 9-12에 나타내었다.

톨 제어 응답은 제어기를 작동시키기 전 초기 자세가 -55°~ -30°으로 달랐던 점을 감안하고, 조종면 명령 값으로 볼 때, FBWS 및 FBWLS의 두 시스템이 거의 동일한 응답을 보였음을 알 수 있다.

피치 입력에 대한 제어 결과는 Fig. 13-16에 나타내었다. 톨 제어 응답과 마찬가지로 제어기 구동시의 초기자세가 -20°~ -2° 혹은 +10°로 달랐음을 감안하면, FBWS와 FBWLS시스템 사이에서의 응답의 차이는 거의 나타나지 않았음을 알 수 있다.

비행실험 당시 기상조건은 평균 풍속 5m/s의 측풍에 의한 외란이 있었다. 하지만, 이러한 외란에도 불구하고 제어기의 자세 제어는 제어명령에 잘 수렴했음을 그래프를 통해 알 수 있다. 또한, FBWS와 FBWLS에 의한 제어기의 응답 특성이 유사함으로 인해 무선 통신에 의해 발생하는 시간 지연 및 데이터 손실이 제어기의 작동에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

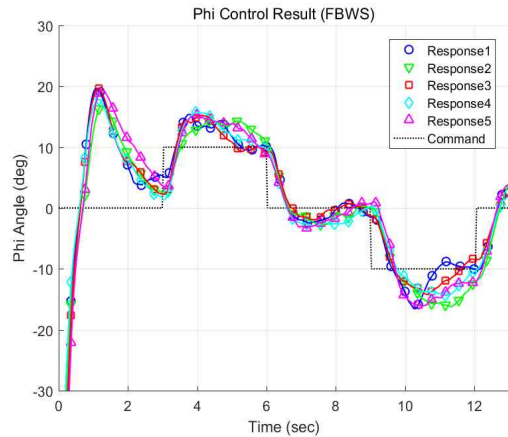


Fig. 9. Phi Control Result by FBWS

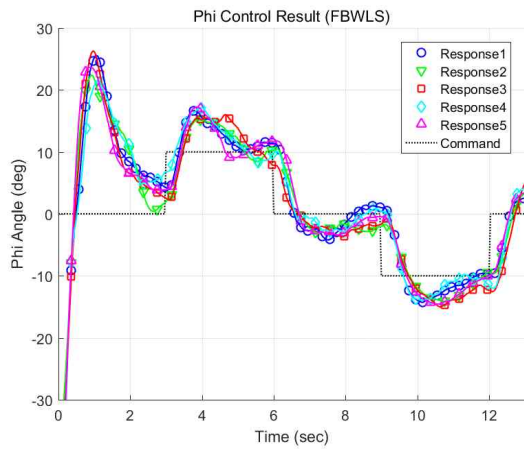


Fig. 10. Phi Control Result by FBWLS

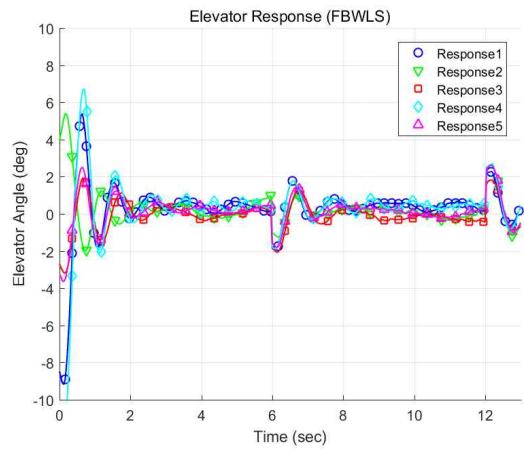


Fig. 13. Elevator Response by FBWLS

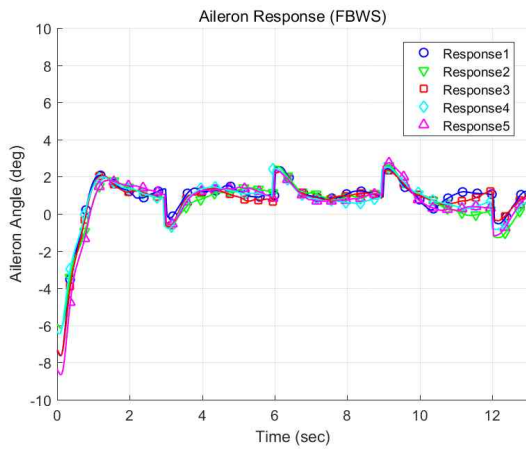


Fig. 11. Aileron Response by FBWS

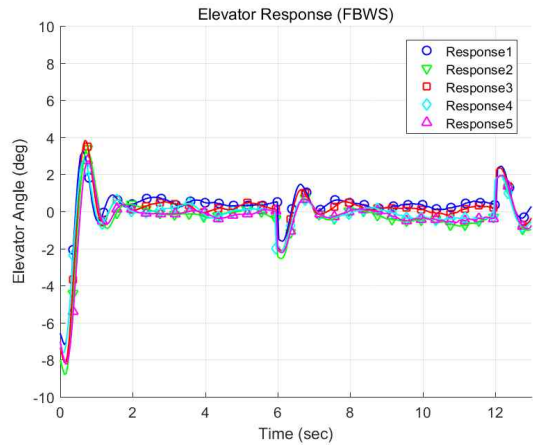


Fig. 14. Elevator Response by FBWS

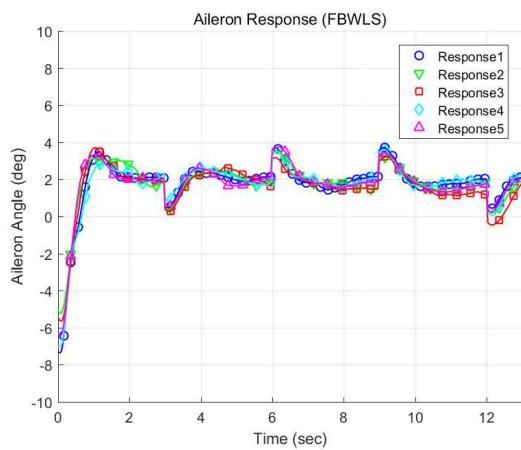


Fig. 12. Aileron Response by FBWLS

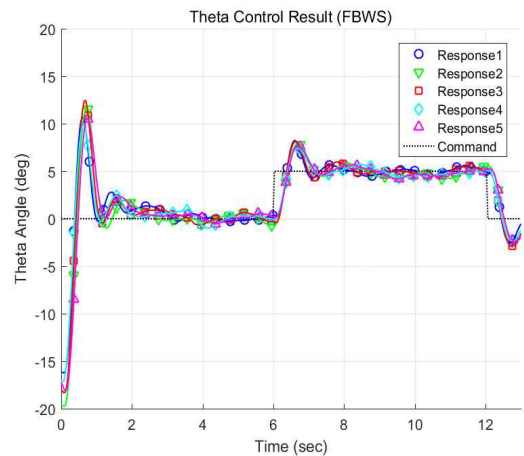


Fig. 15. Theta Control Result by FBWS

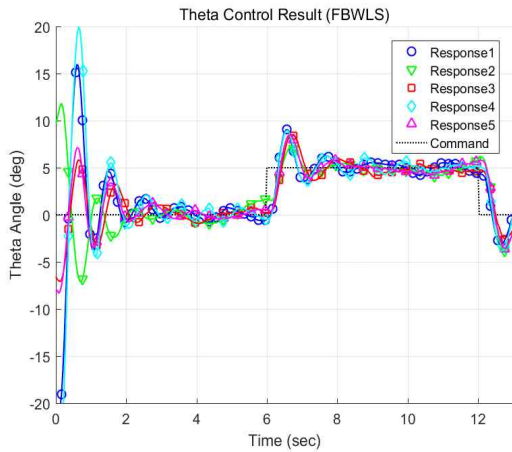


Fig. 16. Theta Control Result by FBWLS

### 2.5.3 자동항법 비행

FBWLS를 사용한 자동 비행의 안정성이 입증되었으므로, 시선각 유도 항법을 이용한 자동항법장치를 항공기에 탑재하여 자동 항법 비행을 약 15초간 수행했다. 자동항법장치에 의한 항공기의 비행경로를 다음의 Fig. 17과 같이 Google 지도 위에 나타냈다. 황색 쇄선은 지상의 조종사에 의한 비행 궤적이고, 백색 실선은 자동항법장치에 의한 비행 궤적이다. 경로점과 자동항법장치가 작동한 지점을 각각 백색 점으로 나타냈다.

항법 제어기가 켜지자 항공기는 경로점을 향하도록 선회하여 경로점을 추종했다. 2.5.1에서 진행되었던 비행시험과 마찬가지로 자동항법장치에 의한 비행 역시 FBWLS를 적용한 상태에서 이상 없이 비행이 진행됨을 알 수 있었다.

## III. 결 론

FBWLS는 경제적인 측면에서 큰 이득을 거둘 수 있는 시스템이다. FBWLS에 비해 가벼워진 기체로 효율적인 운용이 가능해지며 정비성 역시 향상되어 경제적인 이득이 기대되는 것이 그 이유이다. 비록, 본 연구에서 사용했던 모형기의 경우 크기가 작고 FBWLS가 적용되지 않은 시스템의 배선이 복잡하지 않아 경량화의 전체 중량 5kg 대비 약 5g에 불과했다. 하지만, 주로 FBWLS가 사용될 대형 항공기에 적용된다면 그로 인한 중량 감소 효과가 클 것으로 예상된다.

FBWLS에서 가장 우려되는 사항은 무선 통신으로 인한 데이터 손실과 시간지연이지만, 본 연

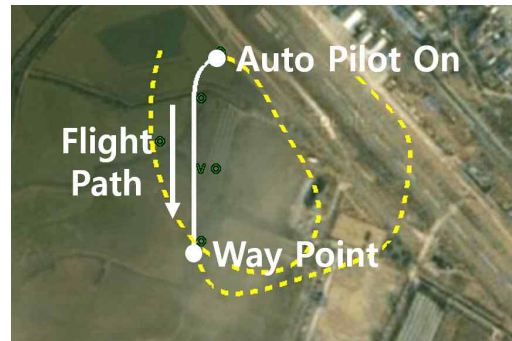


Fig. 17. Trajectory of Autonomous Flight

구에서 사용한 Zigbee를 이용한 무선 통신은 데이터 손실과 시간지연으로 인한 자동비행의 문제점은 나타나지 않았다. 이를 토대로 본 연구에서는 소형 무인 항공기를 사용해 FBWLS이 실현 가능성을 보여주었다고 할 수 있다. 하지만, 현대의 항공기는 무미익 형상 등의 설계로 인해 조종면의 수가 증가하기도 하며, 항공기에 탑재되는 센서의 수도 많은 것을 고려하면 연구에 사용된 소형 무인 항공기는 조종면의 수와 센서의 수가 적어 시스템이 복잡하지 않은 편이다.

FBWLS가 대형 항공기에 적용되기 위해서는 여러 종류의 센서 및 조종면과 같은 시스템의 노드 수가 증가된 시스템에서의 실험이 필요하다. 더욱 복잡해진 시스템에서 무선통신을 사용한 대량의 데이터 전송이 손실 및 지연의 문제를 확인하고 해결해야 FBWLS의 실용화를 논할 수 있을 것이다. 특히, 노드의 수가 증가하게 되면 RF 모듈의 수도 증가하게 되고, 이는 다시 항공기의 무게 증가를 초래하게 될 수도 있다. 그러므로 RF 모듈의 수를 최소로 줄이기 위해서는 모듈 하나에 연결되는 노드의 수를 최대화 시켜야 한다.

한 개의 RF모듈 당 여러 개의 센서 및 구동기가 연결될 경우, 이들로부터 받는 데이터 혹은 이들로 보내는 제어 신호에 대한 스케줄링이 필요하게 된다. 이로 인해 자연스럽게 송수신 하는 데이터의 양도 증가하게 된다. 이 경우 데이터를 순차적으로 전송하는데 발생하는 시간 지연에 의한 문제가 발생하는지 보다 정확한 실험 및 검증이 필요하다.

FBWLS의 장점이 극대화되기 위해서는 대형 항공기에 FBWLS를 적용할 필요성이 있으며, 앞으로 FBWLS가 실용화되기까지 대형 항공기에서의 무선송수신실험이 진행되어 보다 복잡한 시스템에서도 FBWLS가 문제없이 작동함을 검증해야 한다.



## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. NRF-2014R1A1A2058471).

## References

- 1) Hespanha, J. P., Naghshtabrizi, P., and Xu, Y., "A survey of recent results in networked control systems." *Proceedings of the IEEE* Vol. 95, No. 1, 2007, pp.138~162.
- 2) National Transportation Safety Board, "In-flight Breakup Over the Atlantic Ocean Trans World Airlines Flight, Boeing 747-131, N93119 Near East Moriches, New York, July 16, 1996", Aircraft Accident Report, 2000
- 3) Ko, S. H., "Covariance upperbound controllers for networked control systems." *Journal of mechanical science and technology* Vol. 26, No. 5 2012, pp.1607~1614.
- 4) Schenato, L., Sinopoli, B., Franceschetti, M., Poolla, K., & Sastry, S. S., "Foundation of control and estimation over lossy networks," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 95, No. 1, 2007, pp.163~187.
- 5) Carvalhal, P., Santos, C., Ferreira, M., Silva, L. and Afonso, J., "Design and Development of a Fly-by-Wireless UAV Platform." *Aerial Vehicles*, 2009
- 6) Lee, J. S., Su, Y. W., and Shen, C. C., "A Comparative Study of Wireless Protocols : Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi," *The 33rd Annual Conference of the IEEE INdustrial Electronics Society*, Taipei, Taiwan, Nov. 2007, pp.46~51.
- 7) McCune, E., "DSSS vs. FHSS narrowband interference performance issues," *Defence Electronics Magazine*, 2000, pp. 90~104.
- 8) Han, J. S., O, S. H., Kang, S. E., and Ko, S. H., "A Survey on Fly-By-Wireless Flight Control Technology," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 22, No. 1, 2014, pp.7~14.
- 9) da Silva, C. A. G., dos Santos, E. L., Ferrari, A. C. K., and dos Filho, H. T., "A Study of the Mesh Topology in a ZigBee Network for Home Automation Application," *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 15, No. 1, 2017, pp.935~942.
- 10) Nourildean, S. W., "A Study of ZigBee Network Topologies for Wireless Sensor Network with One Coordinator and Multiple Coordinators", *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, Vol. 19, No. 4, 2012, pp.64~80.
- 11) Torresen, J., Renton, E., and Jensenius, A. R., "Wireless Sensor Data Collection based on ZigBee Communication," *Proceedings of the 2010 Conference on New Interfaces for Musical Expression*, Sydney, Australia, Jun. 2010, pp. 368~371
- 12) Lee, S. J., Choi, H. S., Lee, J. H. and Jang, J. W., "Generalization and Application of LOS Guidance Law for UAV", *2011 KSAS Spring Conference*, Gyeongju, Korea, Apr. 2011, pp.1375~1380.
- 13) Lee, S. J., "Design of Auto Race-Track and Figure-8 Flight Mode for UAV," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 42, No. 10, Oct. 2014, pp.851~857.