

복합형 무인기의 종방향 제어기 구조에 따른 천이비행 성능 분석

민병문

인하공업전문대학 항공기계공학과
e-mail:bmmin@inhac.ac.kr

Transition flight performance analysis of an hybrid UAV with regard to longitudinal control structure

Byoung-Mun Min

Dept. of Aeronautical and Mechanical Engineering, Inha Technical College

요약

본 연구에서는 미래 신개념 교통수단의 핵심이 될 것으로 전망되고 있는 도심항공교통(UAM)의 eVTOL 비행체의 종축 제어기 구조에 따른 천이비행 성능을 분석하였다. 종축 제어기는 고정익 모드에서 추력으로 속도를, 엘리베이터로 고도를 제어하는 구조와 추력으로 고도를, 엘리베이터로 속도를 제어하는 구조를 고려하였다. 천이비행 시나리오는 일정한 고도의 Hovering 상태에서 고도를 유지하면서 속도를 증속하여 고정익 모드로 천이하는 상황과 Hovering 상태에서 고도와 속도를 동시에 상승/증속하면서 고정익 모드로 천이하는 상황을 설정하고 비선형 시뮬레이션을 통해 종방향 제어기의 성능을 분석하였다.

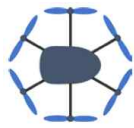
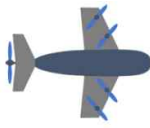

1. 서론

도심 교통혼잡과 탄소배출을 해결하기 위한 친환경 미래 교통수단으로써 도심항공교통(UAM; Urban Air Mobility)이 부상하고 있으며, 이에 적합한 비행체로써 다양한 형태의 전기추진 수직이착륙(eVTOL; Electric Vertical Take-Off and Landing) 비행체 개발에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다 [1]. eVTOL 비행체는 표 1과 같이 크게 세 가지 유형이 존재하는데, 이 가운데 리프트&크루즈(Lift&Cruise, 이하 LC 형상)와 틸트형은 회전익 비행모드와 고정익 비행모드 사이의 전환을 위한 천이비행(Transition Flight)이 요구된다.

고정익 비행모드에서의 종방향 제어는 Throttle을 통해 속도를 제어하고 Elevator를 통해 피치(Pitch) 자세를 변화시켜 고도를 제어하는 방법과 Throttle을 통해 고도를 제어하고 Elevator를 통해 피치 자세 변화를 변화시켜 속도를 제어하는 두 가지 방식이 존재한다. 본 연구에서는 LC 형상 비행체에 대하여 고정익 비행모드의 두 가지 제어 방식에 따라 회전익 비행모드에서 비행 속도를 증속시켜 고정익 비행모드로 천이하는 상황에서 두 가지 방식의 제어기 성능을 비선형 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

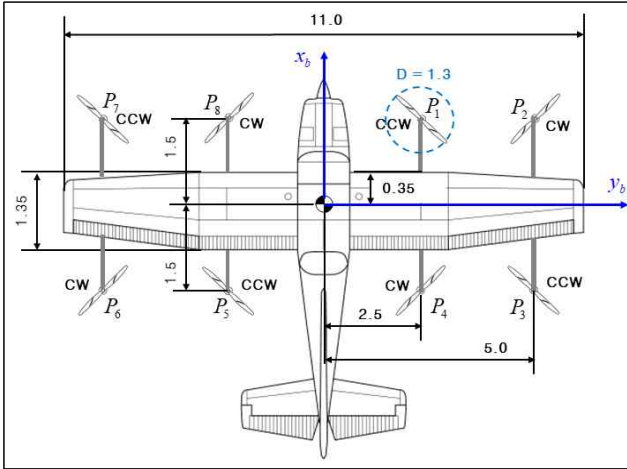
2. 비행체 모델링 및 제어기 구조

[표 1] eVTOL 비행체 유형 및 특징 비교

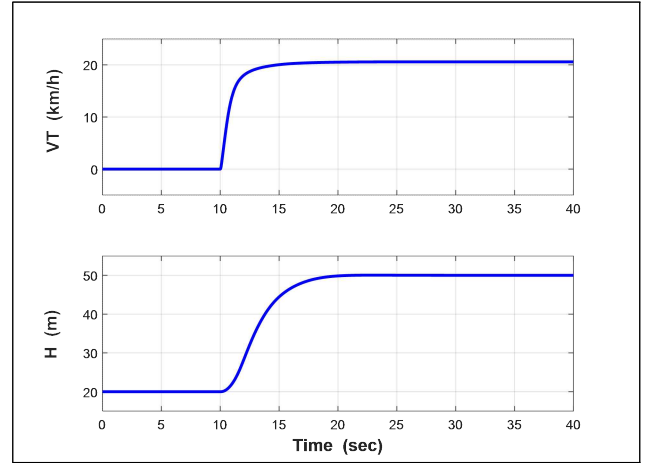
구분	멀티로터	LC 형상	틸트형
형태			
개념	• 다수의 고정된 수직 로터	• 수직/수평 비행을 위한 독립된 고정식 추진부	• 동일한 추진부가 기울어지며(tilt) 수직/수평 비행
비행 모드	회전익	회전익, 고정익, 천이비행	
특징	• 전진비행 저효율 • Hovering 고효율	• 전진비행 고효율 • 틸트형 대비 수직이착륙 용이	• 전진비행 고효율 • Hovering 저효율

2.1 비행체 모델링

본 연구에서 LC 형상 비행체는 美 Wisk Aero 社의 Cora 비행체 제원[2]을 참조하여 해당 비행체와 유사한 제원을 갖는 Cessna 172 항공기의 기본 제원을 적절하게 수정하고 8개의 Lift Propeller를 추가하여 모델링하였다. Lift Propeller의 추력은 참고문헌 [2]에 제시된 동력 계산식을 적용하여 Throttle 75%에서 Hovering 동력이 생성되도록 추력을 결정하였으며, 고정익 비행모드 모델을 위한 공력 데이터는 Digital DATCOM [3]을 통해 산출하였다. 본 연구에서 모델링한 비행체의 기본 형상은 그림 1에 도시하였고 기본 제원은 Cora 비행체와 비교하여 표 2에 정리하였다.



[그림 1] LC 형상 비행체 기본 형상



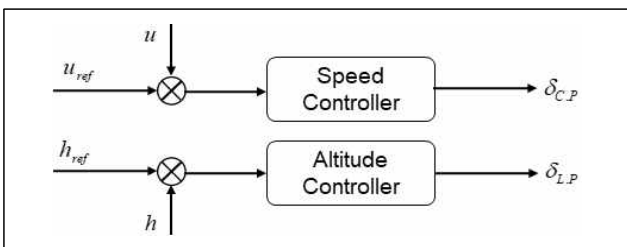
[그림 3] 회전익 비행모드에서의 종방향 제어기 기본 성능

[표 2] LC 형상 비행체 기본 제원

구분	Cora 비행체	LC 형상 비행체
MTOW	1,224 kg	1,100 kg
Fuselage Length	4.8 m	8.28 m
Wing Span	11.0 m	11.0 m
Wing Chord	1.0 m	1.35 m
Wing Area	10.0 m ²	15.0 m ²
Cruise Speed	180 km/h	200 km/h
Cruise Prop. Dia.	2.0 m (Pusher Type)	1.9 m (Tractor Type)
Lift Prop. Dia.	1.3 m	1.3 m
No. of Lift Prop.	12	8

2.2 회전익 비행모드의 종방향 제어기 설계

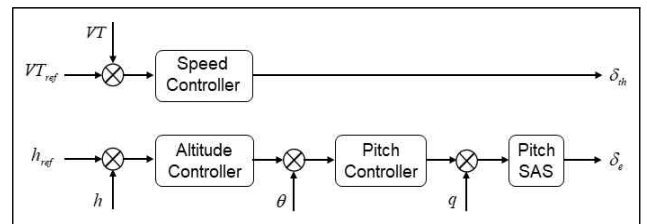
본 연구에서 고려한 LC 형상 비행체의 종방향 제어기는 회전익 비행모드와 고정익 비행모드에 대하여 각각 설계하였다. 회전익 비행모드의 경우, 그림 2에 도시된 바와 같이 Lift Propeller(δ_{LP})를 통해 고도를 제어하고 Cruise Propeller(δ_{CP})를 통해 동체 좌표계의 x-축 방향 속도 u 를 제어하도록 구성하였다. 여기서 속도 제어기는 비례-적분 제어기, 고도 제어기는 비례-미분 제어기로 설계되었으며, 초기 20m 고도를 유지하는 Hovering 상태에서 10 sec 이후에 20 km/h의 속도 명령과 50 m의 고도 명령이 인가된 경우의 제어기 기본 성능은 그림 3에 도시하였다.



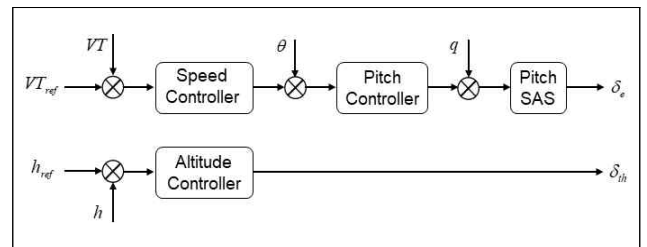
[그림 2] 회전익 비행모드의 종방향 제어기 구조

2.3 고정익 비행모드의 종방향 제어기 설계

LC 형상 비행체의 고정익 비행모드에 대한 종방향 제어기는 그림 4에 도시된 바와 같이 Throttle($\delta_{th} = \delta_{CP}$)을 통해 비행 속도를 제어하고 Elevator(δ_e)을 통해 피치 자세각을 변화시켜 고도를 제어하는 방식과 그림 5와 같이 Throttle을 통해 고도를 제어하고 Elevator를 통해 피치 자세각을 변화시켜 속도를 제어하는 방식이 존재한다. 사실 LC 형상 비행체의 경우 틸트형 비행체와 달리 전진방향 속도 생성을 위한 Cruise Propeller가 동체에 고정된 형태로 장착되어 있기 때문에 속도 제어는 회전익과 고정익 비행모드에서 동일하게 Cruise Propeller(또는 Throttle)을 통해 제어를 수행하는 방식인 Case 1의 제어기 구조가 일반적이다 [4]. 하지만 고정익 비행모드에서 피치 자세 변화를 통한 속도 제어는 저속 비행에서 실속(Stall)을 방지할 수 있는 장점이 있기 때문에 Case 2와 같은 제어기 구조도 필요에 따라 적용이 가능하다.

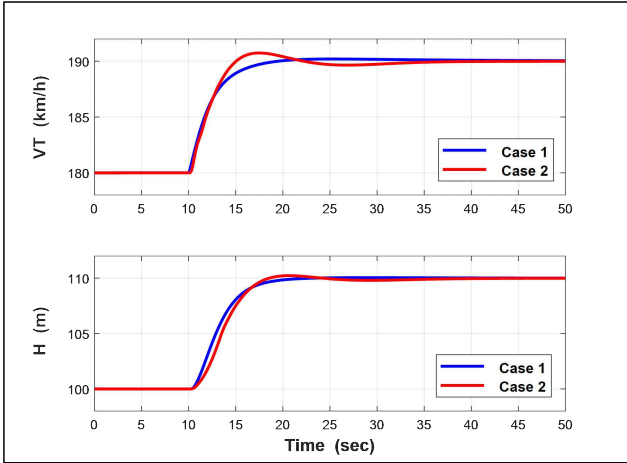


[그림 4] 고정익 비행모드의 종방향 제어기 구조 (Case 1)



[그림 5] 고정익 비행모드의 종방향 제어기 구조 (Case 2)

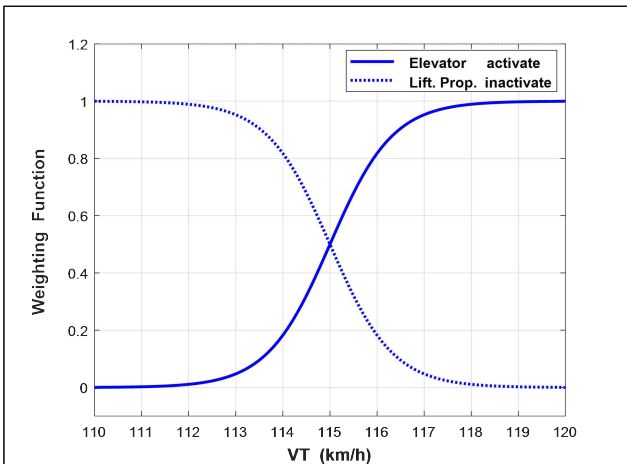
그림 6은 LC 형상 비행체의 고정익 비행모드에서 설계된 중방향 제어기 Case 1과 Case 2의 응답 특성을 비교하여 도시한 것으로, 두 가지 제어 방식에서 유사한 응답 특성이 나타나도록 기본 제어기를 설계하였다.



[그림 6] 중방향 제어기 구조에 따른 기준명령 추종성능 비교

2.4 천이비행 제어

회전의 비행모드에서 속도를 증속하면서 고정익 비행모드로 천이하는 경우, 특정 속도 이상에서는 Lift Propeller의 구동을 정지시키면서 Elevator 조종면 구동을 통한 제어가 이루어져야 한다. 본 연구에서는 그림 7에 도시된 Sigmoid 형태의 가중 함수(Weighting Function)를 통해 고정익 비행모드에서의 실속 속도인 120 km/h의 속도 이상에서 Lift Propeller의 구동은 완전히 정지시키고 Elevator 조종면이 완전하게 작동되도록 설정하였다. 또한 회전의 비행모드에서 Case 2의 중방향 제어 구조를 갖는 고정익 비행모드로 전환될 때 Throttle(또는 Cruise Propeller)과 Elevator를 통한 속도 및 고도 제어기의 전환도 그림 7의 가중 함수를 통해 전환될 수 있도록 하였다.



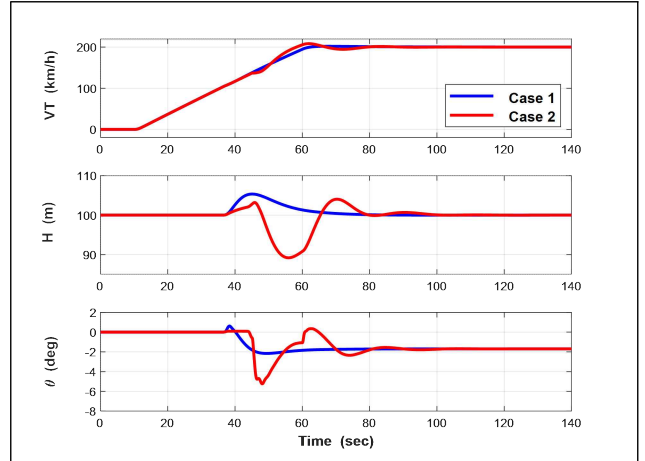
[그림 7] 천이비행 단계의 가중 함수

3. 비선형 시뮬레이션 기반 성능 분석

본 연구에서는 LC 형상 비행체에 대한 고정익 비행모드의 중방향 제어기 구조에 따라 회전의 비행모드에서 고정익 비행모드로 천이할 때의 제어 성능을 비선형 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

3.1 시나리오 1 : 비행고도를 유지하는 천이비행

첫 번째 시나리오는 초기 100m의 비행고도를 유지하는 회전의 비행모드의 Hovering 상태에서 초당 4km/h의 속도 명령을 인가하여 고정익 비행모드의 순항 속도인 200km/h까지 증속하면서 천이하도록 설정하였다. 이때 고도 명령은 초기 비행 고도인 100m를 유지하도록 인가하였다. 첫 번째 시나리오에 대한 비선형 시뮬레이션 결과는 그림 8에 도시하였는데, Case 1 제어기 구조가 비행 속도와 고도 및 피치 자세각이 전체적으로 큰 변화없이 회전의 비행모드에서 고정익 비행모드로 전환이 이루어진다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 Case 2 제어기 구조는 천이비행 과정이 종료되는 120km/h의 고정익 비행모드 실속 속도 인근에서 고도와 속도 제어 방식이 서로 전환되기 때문에 고도 및 피치 자세각 변화가 상대적으로 크게 발생하는 결과가 나타나게 된다.

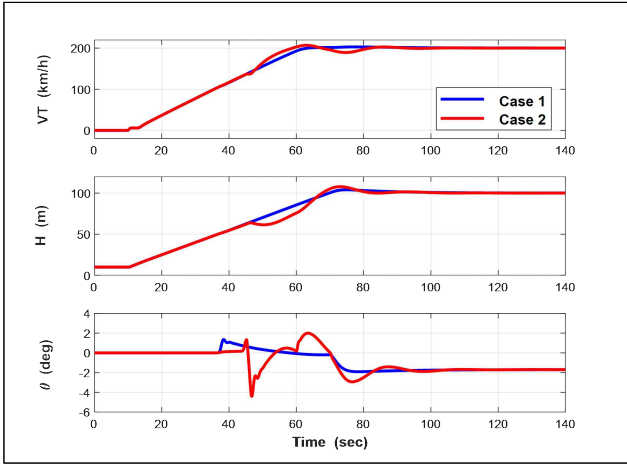


[그림 8] 시나리오 1에 따른 비선형 시뮬레이션 결과 비교

3.2 시나리오 1 : 비행고도를 상승하는 천이비행

두 번째 시나리오는 초기 10m의 비행고도를 유지하는 회전의 비행모드의 Hovering 상태에서 속도는 첫 번째 시나리오와 동일하게 증속되는 명령을 인가하고 고도 명령은 초당 1.5m씩 증가시켜 60sec. 이후에 100m의 목표 고도에 도달하도록 설정하였다. 실제 eVTOL 비행체의 경우 Hovering 비행에서 많은 동력을 소모하기 때문에 이륙 이후 고도와 속도를 동시에 증가시켜 고정익 비행모드로 빠르게 전환시키는

것이 효율적인 것으로 알려져 있다. 두 번째 시나리오에 대한 비선형 시뮬레이션 결과는 그림 9에 도시하였는데, 시나리오 1의 결과와 유사하게 Case 1 제어기 구조가 비행 속도와 고도 및 피치 자세각이 전체적으로 큰 변화없이 회전의 비행모드에서 고정익 비행모드로 전환이 이루어진다는 것을 확인할 수 있다.



[그림 9] 시나리오 2에 따른 비선형 시뮬레이션 결과 비교

4. 결 론

본 연구에서는 eVTOL 비행체 가운데 회전의 비행모드와 고정익 비행모드를 갖고 두 비행모드 사이의 천이비행이 이루어지는 LC 형상 비행체에 대한 모델링을 수행하고 고정익 비행모드에서 적용 가능한 종방향의 두 가지 비행 제어 방식을 설계 적용하였다. 이와 같이 설계된 종방향 제어기는 회전의 비행모드에서 고정익 비행모드로 전환되는 비행 시나리오를 설정하고 비선형 시뮬레이션을 통해 전체적인 성능을 비교 분석하였다. LC 형상 비행체의 경우 회전의 및 고정익 비행모드에서 동일하게 Cruise Propeller를 통해 전진 방향 속도는 제어하게 되면 고도는 제어 수단인 Lift Propeller와 Elevator 조종면만 적절하게 스위칭해주면 되기 때문에 천이 비행 과정에서 속도와 고도 및 피치 자세각이 크게 변하지 않고 천이가 이루어지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 LC 형상 비행체에서 Cruise Propeller가 동체에 고정되어 있어서 이에 따른 추력 방향이 변하지 않기 때문에 도출되는 당연한 결과라고 판단된다. 하지만 회전의 비행모드와 고정익 비행모드에서 Propeller의 추력 방향을 변경시켜 비행모드가 천이되는 틸트형 eVTOL 비행체에서는 다른 결과가 도출될 수 있을 것으로 예상된다. 이는 틸트형 eVTOL의 경우 회전의 비행모드에서는 위쪽 방향을 향하는 Propeller의 추력으로 고도를 제어하고 고정익 비행모드에서는 Propeller의 추력이 앞쪽 방향을 향하기 때문에 비행모드에 따라 속도와 고

도 제어 개념이 전환되는 Case 2의 종방향 제어기 구조가 좀 더 양호한 천이비행 제어 성능을 도출할 수 있을 것으로 기대되기 때문이다.

추후 연구에서는 틸트형 eVTOL 비행체의 모델링을 수행하고 해당 모델에 두 가지 방식의 종방향 제어기 구조를 적용하여 천이비행 과정에서의 전반적인 제어 성능을 비교해 보고자 한다. 또한 종방향의 속도와 고도를 독립적으로 제어하는 기존의 방식이 아닌 종방향의 전체 에너지를 제어하는 Total Energy Control System[5] 개념을 적용한 제어기를 설계 적용하여 기존 제어기와의 성능도 함께 비교 분석할 예정이다.

참고문헌

- [1] _____, 국내 UAM 산업육성을 위한 정책 제언, 한국전자기술연구원(KETI), 2022년.
- [2] A. Bacchini and E. Cestino, "Electric VTOL Configurations Comparison", Aerospace, 2019.
- [3] _____, User Manual Volume I - The USAF Stability and Control Digital DATCOM, AFFDL-TR-79-3032, 1977.
- [4] 강영신 외 7인, "OPPAV 축소기의 제어법칙 설계 및 천이 비행시험", 한국항공우주학회 2021 추계학술대회 논문집, pp. 784-785, 11월, 2021년.
- [5] P. Jimenez et al., "Experimental Validation of Total Energy Control System for UAVs", Energies, Vol. 13, Issue. 14, Jan., 2020.