

강한 바람조건에서의 고정익 항공기 코스제어 기법

이 흥 주^{*,1)}

¹⁾ 국방과학연구소 항공기술연구원

Fixed-wing Aircraft Course Control in Significant Wind

Hongju Lee^{*,1)}

¹⁾ Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 30 January 2019 / Revised 6 March 2019 / Accepted 12 April 2019)

ABSTRACT

Basically the dynamics of the fixed-wing aircraft is based on the airspeed which is relative to the wind, but when it comes to the track guidance and control, ground speed is the factor to be considered. Especially in the case of low-speed fixed-wing unmanned aerial vehicles the difference between the airspeed and the ground speed is significant depending on wind conditions, so that the heading control and the course control have to be designed separately. This paper represents the course control method using the pre-designed heading control gains which meet the desired characteristics. Also, waypoint guidance and control algorithms are suggested applying this control method. Finally the robustness of the proposed method is confirmed by 6-DoF nonlinear simulation.

Key Words : Fixed-wing Aircraft(고정익 항공기), Course Control(코스제어), Heading Control(헤딩제어), Waypoint Guidance(항로점 유도)

기 호 설 명

ψ : 비행체 헤딩값
 χ : 비행체 코스값
 g : 중력가속도
 V_a : 비행체 대기속도
 V_g : 비행체 대지속도
 ϕ : 비행체 롤 각도

K_p : 비례 제어이득
 d : 비행체와 기준궤적과의 수평거리
 K_d : 항로점 기동 유도이득
 R : 원선회 기준 반경

1. 서 론

일반적인 고정익 항공기의 경우 비행체 헤딩을 제어할 때 롤 자세제어 시스템을 내부루프로 하는 뱅크턴을 사용하며^[1], 이때의 비행체 동역학은 바람에 대

* Corresponding author, E-mail: hongjulee@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

한 상대속도인 대기속도를 기반으로 한다. 반면 항로점 기동과 같이 지상 궤적을 따르는 코스를 제어할 경우에는 heading제어와 마찬가지로 벡터법을 사용하지 않고 대기속도가 아닌 대지속도를 기반으로 한다^[2,3].

그동안 바람의 영향을 상대적으로 크게 받는 저속 항공기에 대하여 항로점 기동을 위한 코스제어에서 발생할 수 있는 문제에 관한 연구가 진행되어 왔다. 강한 바람이 불 경우 동일한 롤 각도에 대하여 선회반경이 달라지므로 기준 경로를 벗어날 수 있으며, 심지어 비행체 대기속도보다 강한 정풍이 불 경우 코스방향은 비행체가 가야하는 방향과 정반대가 되어 원하지 않는 비행체 롤 기동이 유발될 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 항로점을 통과했다는 판단반경을 롤 각도 제한치와 바람의 세기 및 방향에 따라 변경하여 바람의 영향으로 인해 경로를 이탈하는 것을 최소화하고 경로의 과도응답이 발생하지 않도록 하는 기법이 연구되었다^[4]. 또한 강한 바람이 불 경우에 코스제어가 불가능한 상황을 판단하여 특정 조건 하에서 heading제어로 전환하거나, 이전에 왔던 경로를 역으로 따라가도록 유도명령을 생성하는 연구가 진행되었다^[5].

그러나 위와 같은 기법을 사용하는 경우에도 heading제어와 코스제어를 동일한 루프로 사용한다면 여전히 잠재적 문제를 갖고 있다. 일반적인 형상을 가진 고정익 항공기의 경우 heading을 제어하는 외부루프의 제어이득 여유가 높게 설계되므로 바람에 대한 기본적인 강건성을 지니고 있다. 또한 유인기의 경우에는 바람속도가 비행체 대기속도에 필적할 정도로 강한 조건이라면 항로점 오토파일럿 기능을 사용하지 않으므로 heading제어 루프를 공유하여도 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 무인항공기의 경우 비행체가 전진이 가능한 상황에서는 항로점 기동을 유지하는 것이 필요하며, 속도가 빠르지 않은 소형 무인기나 강한 상층풍이 부는 고도에서 저속으로 임무를 수행하는 무인기의 경우에는 heading제어 루프의 이득여유만으로는 안정성이 확보되지 않을 수 있다^[6]. 따라서 저속의 고정익 무인항공기는 heading제어와 코스제어 시스템을 별도로 설계하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 heading제어와 코스제어의 기본적인 동역학을 비교하여 바람이 코스제어에 미치는 영향성에 대해 분석하였다. 그리고 해당 영향성을 고려하여 코스제어의 제어이득을 설계하는 방안을 제시하였다. 이를 바탕으로 강한 바람 조건에서도 원하는 설계특성

을 갖는 유도제어기법을 제안하였다. 최종적으로 국내의 편서풍 조건 하에서 고정익 항공기의 6자유도 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 제시하고 제안한 유도제어기법이 가진 특성을 분석하였다.

2. 바람을 고려한 코스제어 제어이득

본 장에서는 heading제어와 코스제어의 동역학이 어떤 차이가 있고 바람이 어떻게 영향을 미치는지 기술하였다^[6].

일반적인 고정익 항공기의 경우 옆미끄럼각은 자체의 안정성에 의해 0으로 수렴하거나 방향축 제어를 통해 0을 유지하도록 제어한다. 일정한 대기속도 및 고도를 유지하며 선회를 수행하는 경우 롤 각도와 heading 또는 코스 변화율의 관계식은 다음과 같다^[3].

$$\dot{\psi} = \frac{g}{V_a} \tan \phi \tag{1}$$

$$\dot{\chi} = \frac{g}{V_g} \tan \phi \tag{2}$$

각각의 제어 오차를 식 (3), (4)와 같이 정의하자.

$$e_{\psi} = \psi_{cmd} - \psi \tag{3}$$

$$e_{\chi} = \chi_{cmd} - \chi \tag{4}$$

바람의 영향성을 직관적으로 확인하기 위하여 heading 및 코스명령이 일정한 경우로 가정하면 이 때 오차의 미분방정식은 식 (5), (6)과 같다.

$$\dot{e}_{\psi} = -\frac{g}{V_a} \tan \phi \tag{5}$$

$$\dot{e}_{\chi} = -\frac{g}{V_g} \tan \phi \tag{6}$$

heading 및 코스제어 시스템으로 비례제어기를 사용하면, 제어변수인 ϕ 는 heading제어의 경우 e_{ψ} , 코스제어의 경우 e_{χ} 에 대하여 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = K_p e_{\psi(\chi)} \tag{7}$$

코스제어기를 별도로 설계하지 않고 heading제어와 동일하게 사용한다는 것은 식 (7)에서의 K_p 를 동일하게 사용한다는 것과 같다. 즉, 바람이 있을 경우에는 V_a 와 V_g 가 달라지므로 동일한 K_p 에 대하여 식 (5), (6)에 의해 오차의 변화율이 달라진다. 만약 바람에 의하여 대기속도가 대기속도의 두 배인 경우, 동일한 제어이득에서 heading오차의 변화율은 코스오차의 변화율에 비해 두 배가 된다. 이는 마치 제어이득이 두 배가 된 것과 같은 상황으로 코스제어의 안정성에 영향을 준다. 특히 바람의 속도가 비행체 대기속도와 유사할 정도로 강한 경우에는 동일한 원리에 의해 제어이득이 절반이 되거나 무한히 커지는 결과를 얻게 된다. 즉, 비행체 heading에 따라 코스제어 성능이 급격히 떨어지거나 발산할 가능성도 있다. 따라서 비행체 대기속도가 바람의 속도와 유사할 가능성이 있는 시스템의 경우에는 heading제어와 코스제어의 제어이득을 공유하지 않고 별도로 설계하는 것이 필수적이다.

만약 비행체 정보로 V_a 와 V_g 를 알고 있다면 이러한 문제를 간단한 방법으로 해결할 수 있다. heading제어의 제어이득인 K_p^ψ 가 원하는 제어특성을 갖도록 설계된 값이라고 할 때 코스제어의 제어이득 K_p^χ 를 식 (8)과 같이 설정할 경우,

$$K_p^\chi = \frac{V_g}{V_a} K_p^\psi \quad (8)$$

식 (6)은 충분히 작은 e_x 에 대해서 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_x &= -\frac{g}{V_g} \tan(K_p^\chi e_x) \\ &\approx -\frac{g}{V_g} K_p^\chi e_x \\ &= -\frac{g}{V_a} K_p^\psi e_x \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)에서 설정한 코스제어 제어이득의 의미는 바람의 세기에 따라 제어이득을 변경하겠다는 것이다. 예를 들어 비행체의 대기속도가 200 km/h인 상황에서 정풍이 100 km/h로 분다면 코스제어의 제어이득은 heading제어 제어이득의 절반으로 사용하고, 반대로 배풍이 100 km/h로 분다면 1.5배로 사용하게 된다. 이렇게 제어이득을 사용할 경우 식 (9)에서 볼 수 있듯이 heading제어

의 변화율과 동일한 변화율로 코스를 변화시키는 제어를 갖게 되고, 다시 말하면 선형해석을 수행하는 기본 방정식이 동일해진다. 결론적으로 코스제어의 제어이득으로 비행체 상태정보인 V_a 와 V_g 를 이용한다면 각 설계점에 대하여 별도의 설계를 하지 않아도 heading제어의 제어특성과 동일한 코스제어기를 얻을 수 있다.

3. 항로점 기동을 위한 코스 유도제어기법

항로점 기동은 지면에 대한 비행체의 움직임을 수행해야 하므로 대기속도 기반의 코스제어를 수행해야 한다. 본 장에서는 2차원에서의 직선기동 및 원기동을 수행하기 위한 코스 유도명령 및 롤 제어명령을 생성하는 알고리즘을 제안하였다. 그리고 제안한 유도제어기법의 특성을 확인하였다.

3.1 직선 추종을 위한 코스제어

Fig. 1과 같이 WP_1 에서 WP_2 로 직선 기동을 두 항로점 간 직선을 따라가도록 코스제어를 수행할 경우 코스 유도명령은 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\chi_{cmd} = \chi_{ref} + K_a d \quad (10)$$

여기에서 χ_{ref} 는 아래와 같이 정의한다.

$$\chi_{ref} = \tan^{-1} \left(\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \right) \quad (11)$$

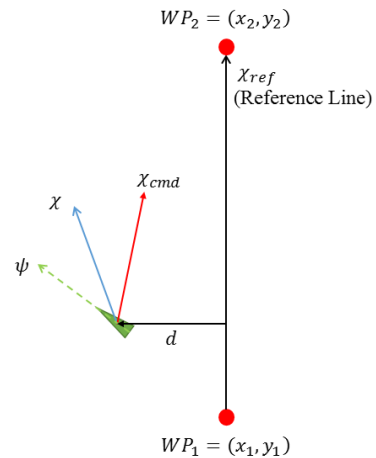


Fig. 1. Line tracking

직선 궤적을 따르는 기동에서는 χ_{ref} 값이 일정하므로 오차방정식은 다음과 같이 전개된다.

$$e_\chi = \chi_{cmd} - \chi \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_\chi &= \dot{\chi}_{cmd} - \dot{\chi} \\ &= K_d \dot{d} - \dot{\chi} \\ &= K_d V_g \sin(\chi_{ref} - \chi) - \frac{g}{V_g} \tan \phi \end{aligned} \quad (13)$$

제어명령인 ϕ 를 식 (14) 같이 설정할 경우 오차방정식은 식 (15)와 같이 정리된다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_g^2}{g} K_d \sin(\chi_{ref} - \chi) + K_p (\chi_{ref} + K_d d - \chi) \right\} \quad (14)$$

$$\dot{e}_\chi = -\frac{g}{V_g} K_p e_\chi \quad (15)$$

이 경우 직선 추종을 위한 코스 유도제어 시스템의 안정성은 자명하게 확보된다. 위의 식 전개에서 보면 알 수 있듯이 χ_{cmd} 의 K_d 값은 시스템 안정성에 영향을 주지는 않지만 비행체의 ϕ_{cmd} 제한치를 고려하여 그 값이 설정되어야 한다.

만약 $\chi = \chi_{ref}$ 인 경우, 제어명령은 식 (16)와 같이 직선궤적에서 떨어진 거리에 의해 결정되며, $d = 0$ 인 경우에는 식 (17)과 같이 코스방향 차이로 롤 명령이 결정된다.

$$\phi = \tan^{-1}(K_p K_d d) \quad (16)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_g^2}{g} K_d \sin(\chi_{ref} - \chi) + K_p (\chi_{ref} - \chi) \right) \quad (17)$$

식 (14)의 제어이득 K_p 를 식 (8)과 같이 사용한다면 식 (15)는 식 (9)와 동치가 된다. 즉, 기존에 선형해석을 바탕으로 설계된 헤딩제어기 특성과 동일한 유도제어 특성을 지니는 직선 추종 유도제어기를 얻을 수 있다.

3.2 원선회를 위한 코스제어

Fig. 2와 같이 지면에 대하여 기준 원을 따라 선회를 수행할 경우 코스 유도명령은 다음과 같이 설정할 수 있다.

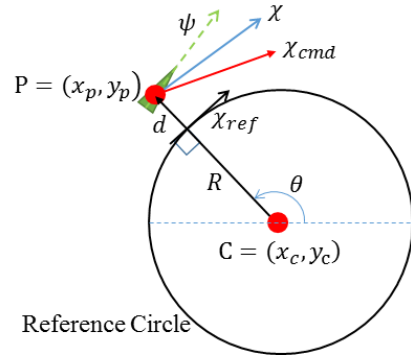


Fig. 2. Circling

$$\chi_{cmd} = \chi_{ref} + K_d d \quad (18)$$

여기에서 χ_{ref} 는 원의 접선방향으로 아래와 같이 정의한다.

$$\chi_{ref} = \begin{cases} \pi - \theta & , (cw) \\ -\theta & , (ccw) \end{cases} \quad (19)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{y_p - y_c}{x_p - x_c} \right) \quad (20)$$

오차방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$e_\chi = \chi_{cmd} - \chi \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_\chi &= \dot{\chi}_{cmd} - \dot{\chi} \\ &= \dot{\chi}_{ref} + K_d \dot{d} - \dot{\chi} \end{aligned} \quad (22)$$

여기에서 $\dot{\chi}_{ref}$, \dot{d} , $\dot{\chi}$ 은 각각 다음과 같다.

$$\dot{\chi}_{ref} = \frac{V_g}{R + d} \cos(\chi_{ref} - \chi) \quad (23)$$

$$\dot{d} = V_g \sin(\chi_{ref} - \chi) \quad (24)$$

$$\dot{\chi} = \frac{g}{V_g} \tan \phi \quad (25)$$

이 때 제어명령인 ϕ 를 식 (26) 같이 설정할 경우 오차의 미분방정식은 식 (27)과 같이 정리된다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_g}{g} \left(\frac{V_g}{R+d} \cos(\chi_{ref} - \chi) + K_d V_g \sin(\chi_{ref} - \chi) \right) + K_p (\chi_{ref} + K_d d - \chi) \right\} \quad (26)$$

$$\dot{e}_\chi = -\frac{g}{V} K_p e_\chi \quad (27)$$

만약 $\chi = \chi_{ref}$ 인 경우 제어명령은 궤적에서 떨어진 거리로 결정되고, $d = 0$ 인 경우에는 제어명령이 코스방향 차이로 결정된다. 그리고 $d = \chi_{ref} - \chi = 0$ 인 경우 롤 명령은 원선회를 위한 기준 롤 명령인 ϕ_{ref} 가 된다.

$$\phi_{ref} = \tan^{-1} \left(\frac{V^2}{gR} \right) \quad (28)$$

원선회를 위한 유도명령 역시 직선 기동과 마찬가지로 K_d 에 상관없이 시스템에 대한 안정성을 확보하며, 그 값은 ϕ_{cmd} 제한치를 고려하여 설정해야 한다. 특히 원선회의 경우 원하는 원의 반경을 돌기 위한 기준 롤 명령 ϕ_{ref} 이 필요하므로 추가 여유를 확보하여야 한다. 또한 식 (26)의 제어이득 K_p 를 식 (8)과 같이 사용한다면 식 (27)은 식 (9)와 동치가 된다. 결론적으로 코스 유도명령과 제어명령을 각각 식 (18), (26)과 같이 설정할 경우 원선회를 위한 코스 유도제어 특성은 각 설계점별 헤딩제어기 선형해석 특성과 일치한 결과를 얻을 수 있다. 결론적으로 제시한 항로점 기동 유도제어기법은 비선형 유도제어기로서 리아푸노프 안정성은 자명하게 만족할 뿐만 아니라 시스템 특성에 대한 해석 결과를 알 수 있다는 장점이 있다.

직선추종 및 선회를 수행하는 비행체에 대하여 식 (26)은 항로점 기동을 위한 코스 유도제어기의 가장 일반적인 형태로 볼 수 있다. 비행체가 직선을 추종하는 기동을 수행하는 경우는 원의 반경이 무한대인 상황이라고 설정할 수 있다. 이 경우 식 (26)의 첫 번째 항이 0에 수렴하여 결국 식 (14)와 동일한 제어명령이 된다. 만약 항로점 기동이 아닌 일정한 코스를 유지하는 것이 필요한 경우에는 비행체 위치에 대한 보상 역시 별도로 하지 않아도 되므로 K_d 가 0인 상황과 같다. 이 경우 일정한 코스명령 추종을 위한 제어명령인 식 (9)와 동일하게 된다.

4. 시뮬레이션

직선, 원선회 항로점 기동에 대해 헤딩제어기를 그대로 사용한 경우와 제안한 코스 제어명령을 활용한 경우 각각에 대해 6자유도 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 항로점 기동을 위한 유도명령은 동일하게 사용하였다.

Table 1. Simulation condition

시뮬레이션 변수	값
바람 속도	350 km/h
바람 방향	270 deg
항공기 대기속도 명령	370 km/h
비행체 고도 명령	12 km
롤 각도 제한치	±35 deg

위 표는 시뮬레이션 조건을 정리한 것이다. 바람 조건은 국내의 편서풍이 가장 강한 겨울철 1 % 분위의 바람을 고려하였고, 그 중에서 가장 강한 바람이 부는 12 km로 시뮬레이션 고도를 설정하였다⁷⁾. 항로점 기동을 수행함에 있어서 바람이 제어 안정성에 미치는 영향을 명확하게 보기 위하여 비행체 대기속도는 바람 속도의 105 % 수준을 명령으로 하여 이를 추종하도록 하였다. 즉, 헤딩제어 루프의 자체의 이득여유만으로는 안정성이 유지되지 않는 가혹한 조건의 속도 값을 설정하였다.

4.1 직선 추종 기동 시뮬레이션

직선 추종 기동에 대한 시뮬레이션을 수행할 때 바람 방향은 정풍인 경우와 배풍인 경우 각각에 대해 고려하였다.

시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다.

- 정북 방향으로 비행 시작
- 90도(배풍) 또는 270도(정풍) 방향의 직선 레그가 되도록 항로점을 설정
- 직선 레그로부터 비행체가 4 km 이내에 접근 시 항로점 기동 시작
- 비행체 상태 확인

Fig. 3은 배풍인 조건에서 항공기 궤적을 그린 것이

고 Fig. 4는 정풍인 조건에서의 궤적을 그린 것으로, 각각 코스제어 이득을 K_p^y 로 한 경우, K_p^z 로 한 경우에 대해 궤적을 표시하였다. 바람이 없는 조건에서의 궤적은 상호 비교를 위해 같이 나타내었다.

앞 장에서 언급한 바람의 영향성은 Fig. 3과 Fig. 4에 잘 드러난다. 배풍 조건에서 코스제어 이득으로 heading 제어 이득을 그대로 사용한 경우 바람에 의해 궤적을 벗어났다가 맞춰 들어오는 반면 제안한 코스제어 이득을 사용한 경우 원하는 궤적을 추종하는 성능이 더 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 또한 정풍 조건에서 heading 제어 이득을 그대로 사용한 경우에는 항로점 기동을 정상적으로 수행하지 못하고 비행체가 좌우로 흔들거리면서 진행함을 확인할 수 있다. 이러한 현상

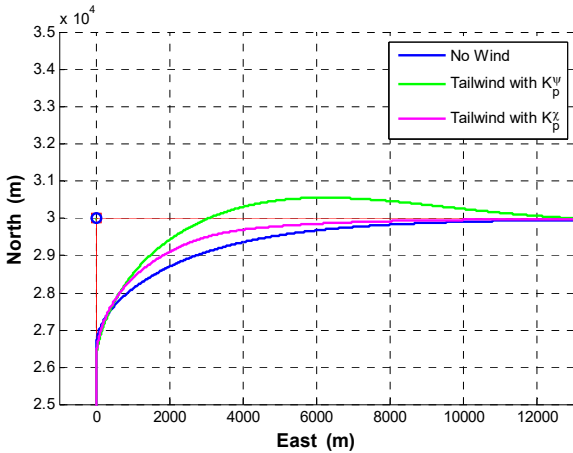


Fig. 3. Trajectory of line-tracking in tailwind

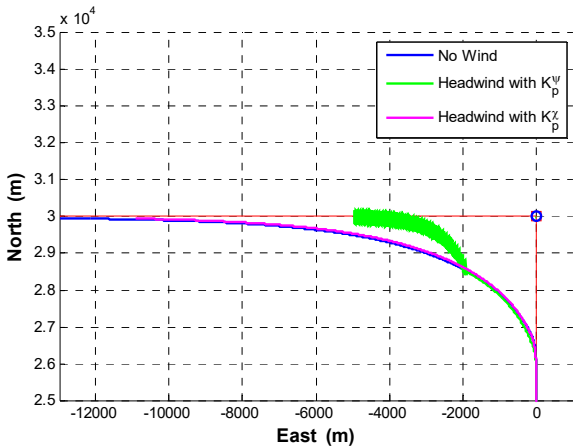


Fig. 4. Trajectory of line-tracking in headwind

들은 heading 제어의 제어이득을 코스제어에서 그대로 사용할 경우 코스제어 시스템 입장에서 배풍일 때에는 제어이득이 작아지는 것과 같은 영향이 있고 정풍일 때에는 커지는 것과 동일한 영향이 있기 때문이다. 반면 제안한 코스제어기를 사용하는 경우 제어이득이 실시간으로 비행체 상태에 맞게 조절되므로 바람에 무관하게 정상적으로 항로점 기동을 수행하게 된다.

제안한 코스제어기를 사용한 경우에 수학적으로는 무풍조건과 동일한 궤적을 그려야 하나 Fig. 3을 보면 약간의 차이를 보인다. 이러한 현상은 비행체 롤 각도 제한치 때문에 발생한다. 이를 확인하기 위하여 배풍 조건에서의 롤 명령, 롤 각도, 그리고 코스값을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5를 보면 제안한 코스제어 이득을 사용한 경우 최대 롤 각도인 35도에 걸린 것을 알 수 있다. 즉, 롤 제한으로 인해 더 급하게 우측으로 선회하지 못하여 무풍조건과의 비행체 궤적과 차이를 보이는 것이다.

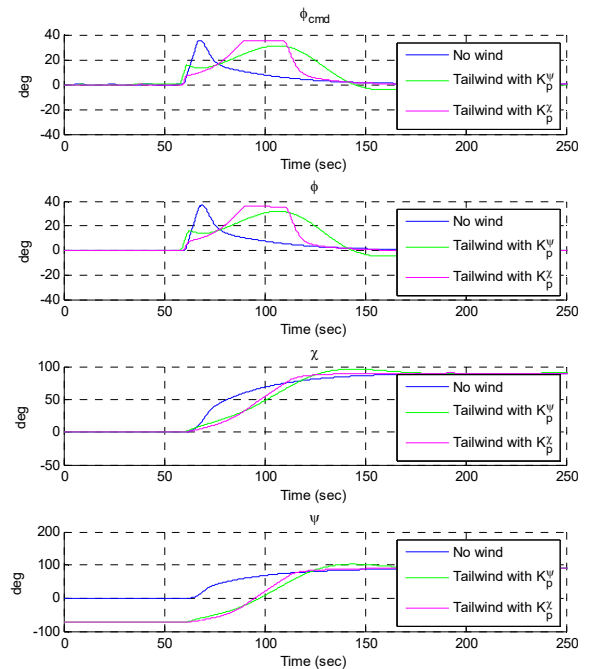


Fig. 5. Attitude of line-tracking in tailwind

정풍인 경우에는 비행체 대지속도가 매우 작아지기 때문에 코스제어 이득 역시 줄어들어 롤 각도 제한치 이내에 있게 된다. 따라서 Fig. 4와 같이 제안한 코스제어 이득을 사용한 경우와 무풍인 경우의 궤적이 거

의 동일하게 된다. 두 궤적 간 미세한 차이는 롤 명령에 따른 실제 비행체의 반응 속도가 무한하게 빠를 수 없기 때문에 발생하는 것이다. 정풍에서의 롤 명령, 각도, 코스값을 나타낸 Fig. 6을 보면 제안한 코스제어기를 사용한 경우의 롤 명령이 제한치 이내에 있음을 확인할 수 있다. 반면 정풍 조건에서 heading제어 이득을 그대로 코스제어에 활용한 결과를 보면 직선 추종 기동을 위한 제어 시스템이 발산하여 롤, 코스 모두 진동하는 것을 확인할 수 있다.

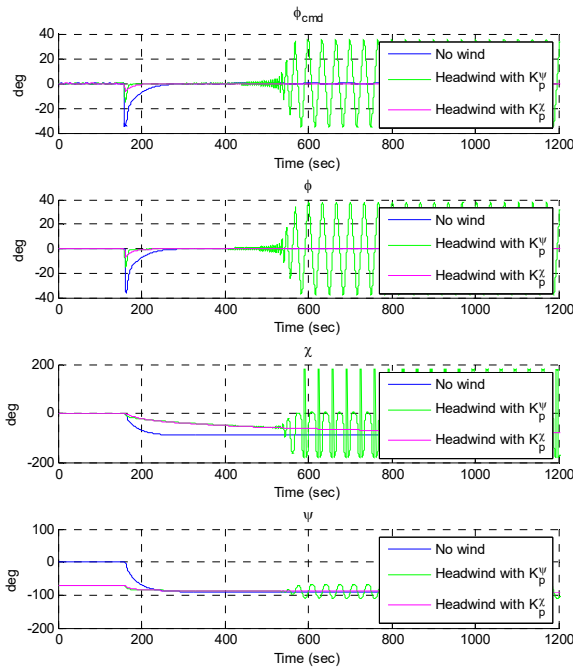


Fig. 6. Attitude of line-tracking in headwind

4.2 원선회 기동 시뮬레이션

편서풍이 강한 고고도에서는 일반적으로 풍향과 풍속이 급격하게 변하지 않으므로 비행체 입장에서는 원선회를 수행하는 동안 정풍과 배풍을 모두 겪는 상황이 연출된다. 따라서 시뮬레이션은 시계방향으로 원선회를 수행하는 경우에 대해서만 수행하였다.

시뮬레이션 시나리오는 다음과 같다.

- 정북 방향으로 항로점 기동 시작
- 항로점 기준 8 km 앞에서부터 6 km 원을 따라 시계방향 선회 수행
- 비행체 상태 확인

시뮬레이션 궤적은 Fig. 7과 같다. 직선 추종의 경우와 마찬가지로 바람이 없는 조건의 궤적과 제안한 항로점 제어 기법을 사용한 경우의 궤적이 거의 일치함을 확인할 수 있다. 반면 비행체 대지속도가 큰 구간인 원의 북쪽에서는 기존 heading제어 루프를 그대로 사용한 경우 기존 궤적에서 멀어지는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 비행체 궤적이 나오는 것은 4.1절에서 설명한 원인과 동일하다.

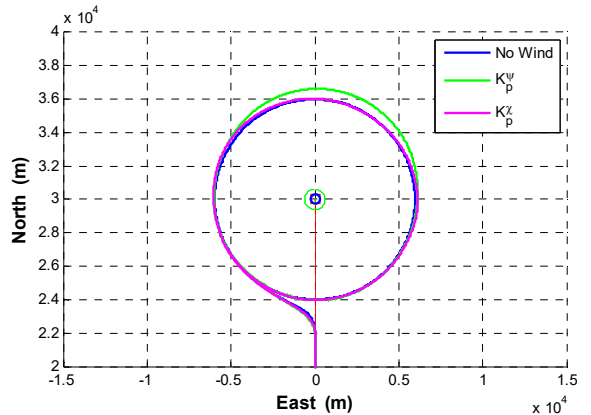


Fig. 7. Trajectory of circling

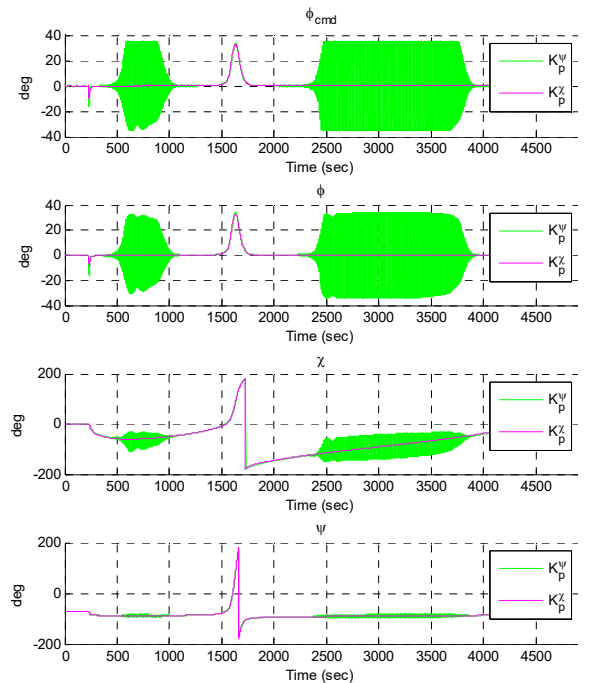


Fig. 8. Attitude of circling

원선회 구간에서의 롤 명령, 롤 각도, 그리고 코스값은 Fig. 8에 나타내었다. 1650초 부근이 비행체가 가장 북쪽에서 비행하는 시점이며 3000초 부근이 가장 남쪽에서 비행하는 때이다. 정풍 상황인 원의 남쪽 부근에서 제안한 코스제어 기법을 사용한 경우에는 롤 명령을 거의 생성하지 않음으로써 비행체 안정성을 확보함과 동시에 원선회를 정상적으로 수행하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 헤딩제어 루프를 사용한 경우에 유도제어 시스템은 발산하는 것을 확인할 수 있다.

원선회 시 비행체 대기속도와 대지속도를 비교하면 Fig. 9와 같다. 비행체 헤딩에 따라 대지속도는 20 km/h부터 720 km/h까지 변하며, 이를 대기속도의 비율로 따지면 0.05배 ~ 1.95배이다. 앞의 시뮬레이션 결과들은 이렇게 큰 대지속도의 변화에 대해 대처하는 설계가 반드시 필요함을 명확히 보여주며, 제안한 유도제어기법이 이러한 요구를 만족시킴을 확인하였다.

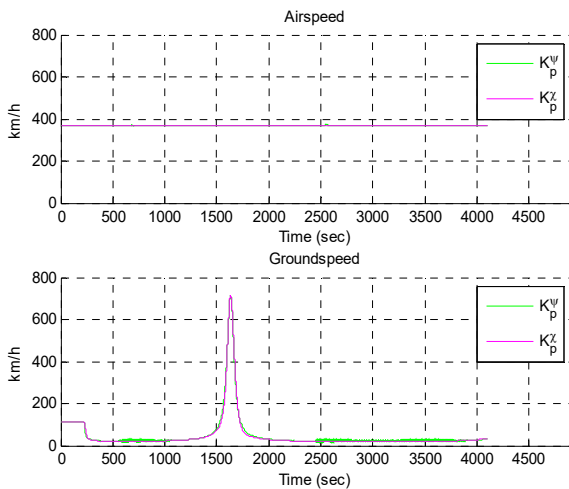


Fig. 9. AS & GS of circling

5. 결론

항로점 기동은 지상 참조점을 기준으로 비행하므로 대지속도를 기반으로 하는 코스제어를 수행해야 한다. 특히 바람의 영향을 크게 받는 저속의 고정익 무인항공기의 경우 항로점 기동을 위한 유도 및 제어방법은 헤딩제어 시스템과 다르게 설계해야 한다.

이제까지 헤딩제어 루프를 항로점 기동의 코스제어에 그대로 활용할 경우 배풍에서는 제어이득이 감소하는 것과 같은 영향을 받으며, 정풍에서는 반대로 증가하는 것과 같다는 것을 확인하였다. 기실 많은 항공기의 경우 기체 속도에 준하는 바람에서 항로점 기동을 수행하지 않으므로 헤딩제어 루프의 제어이득 여유 내에서 비행이 가능할 수도 있으나 그 특성이 설계한 값과 필연적으로 달라지므로 위험성을 내포한다고 볼 수 있다. 반면 앞에서 제안한 항로점 기동 유도제어 기법은 별도로 유도 및 제어이득을 설계하지 않고도 헤딩제어의 설계치를 그대로 유지하면서 바람조건에서도 무풍에서와 동일한 특성으로 비행할 수 있다는 장점이 있다. 이로 인해 비행체 속도에 준하는 바람조건 하에서도 안정성을 보장함은 물론이고 비행 궤적까지 오차의 큰 증가 없이 비행이 가능함을 확인하였다.

References

- [1] B. Kim, et. al., "Flight Dynamics and Control," Kyungmoonsa, Seoul, p. 190, 2007
- [2] R. Rysdyk, "Course and Heading Changes in Significant Wind," J. Guidance, Control, And Dynamics, Vol. 30, No. 4, pp. 1168~1171, 2007.
- [3] B. Stevens, F. Lewis, and E. Johnson, "Aircraft Control and Simulation," Wiley, New York, pp. 342~344, 2015.
- [4] J. Osborne and R. Rysdyk, "Waypoint Guidance for Small UAVs in Wind," AIAA Infotech@Aerospace Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 459-470, 2005.
- [5] G. Byeon and S. Park, "Backward Path Following Under a Strong Headwind for UAV," KSAS Spring Conference Proceedings, Vol. 42, No. 5, pp. 376-382, 2014.
- [6] H. Lee, "Aircraft Course Control in Wind Condition," KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 1628-1629, 2017.
- [7] H. Kim, "Analysis of Operational Environment for Aircraft in the Korean Peninsula," KSAS Fall Conference Proceedings, pp. 1629-1632, 2014.