

# 스마트 무인기 충돌회피성능 분석

## Evaluation of Collision Avoidance Maneuvers for Smart UAV

황수정, 오수훈\*, 구삼욱 (한국항공우주연구원)

### 1. 서론

항공 교통의 대중화에 따라 지상에서나 볼 수 있는 교통 체증을 항공기가 이착륙하는 공항에서도 쉽게 볼 수 있게 되었다. 지루한 이착륙 대기 시간과 제한된 활주로 시설은 경제적인 중대형 수직이착륙 여객기 개발의 타당성을 긍정적으로 검토하게 만들고 있으며, 통신 전자기술의 급속한 발전은 여객 수송 이외의 대부분 임무를 유인기에서 무인기로 넘겨줄 것이라는 전망을 낳게 하고 있다. 2004년 발표된 미국 항공운항협회의 통계에 따르면 민간 항공기의 사고 중 70% 이상이 항공기 자체의 기계적 결함이 아닌 조종사나 관제의 오류로 일어나고 있으며, 충돌 사고의 절반이 착륙을 위한 접근 하강 비행 중에 발생한다고 보고되고 있다[1]. 1993년부터 2002년까지 민수용 경항공기의 사고율은 100,000 비행 시간당 평균 약 7회 수준으로 해마다 약간씩 감소 추세를 나타내고 있는데, 무인 항공기가 민간 항공기 공역에 본격적으로 진입이 예상되는 2010년대 이후에는 충돌에 의한 사고율이 증가 추세로 반전될 가능성이 높다.

이러한 배경 하에 지형물 및 항공기간 충돌 위험을 대폭적으로 줄일 수 있는 최적의 공역 개념이 1990년대부터 본격적으로 연구되어 왔으며[2], 최근 들어 무인기의 본격적인 활용을 위하여 무인기의 충돌 감지 및 회피에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 항공기의 충돌 대상은 그 대상이 어느 속도 이상으로 움직이는지의 여부에 따라 지형물과 타항공기 두 가지로 나뉘어 질 수 있다. 본 논문에서는 지형물 충돌을 중심으로 다루되, 충돌 대상을 구체적으로 정의하고, 이의 회피 기동을 모사함으로써 스마트 무인기의 충돌회피 성능을 평가해보기로 한다. 일반적으로 충돌 회피 시간을 정확히 파악하기 위해서는 충돌 대상을 감지(detect), 인식(recognize), 판단(decide), 기동(maneuver)

의 순서로 충돌 회피에 필요한 각각의 시간들이 모두 고려되어야 하나, 본 고에서는 이 중에서 기동 부분만으로 논점을 제한하고자 한다.

### 2. 해석 방법 및 조건

#### 해석 대상

스마트 무인기는 1,000kg급 틸트로터 지능형 무인기로서 회전익, 천이, 고정익 세 가지 모드로 비행이 가능하다(그림 1). 그러나 실제 비행 시에는 보다 높은 비행 효율과 성능을 얻기 위해서 대부분의 임무를 고정익으로 수행하게 된다. 현재 예측되는 최대 속도는 시속 약 460km이며, 설계 기동속도(Maneuver Speed)는 400 km/h이다. 본 고에서는 고정익 모드 비행에 한하여 주로 기동속도로 비행할 때 충돌회피 기동을 분석한 결과를 논하기로 한다.

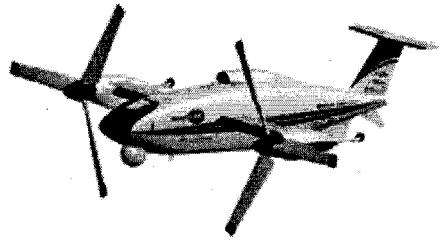


그림 1 스마트 무인기

#### 해석 기법

기동의 모사에는 식(1)과 같은 일반적인 6자유도 고정익 항공기 운동 방정식을 수치 적분(numerical integration)하는 방법을 사용하였다. 방정식중 속도 및 각속도의 2차항들은 해석 결과에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 계산의 효율을 높이기 위해서 시간간격을 지연(one time step lagging)시키는 방법을 사용하였다. 해석에 사용된 시간간격은 0.001초이다. 식(1)에 필요한 공력 및 추진 데이터들은 각각

풍동시험에 기반을 둔 공력 데이터베이스와 PW206C 엔진 데이터가 사용되었다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{U} - VR + WR) &= W_x + F_{Ax} + F_{Tx} \\
 m(\dot{V} + UR - WR) &= W_y + F_{Ay} + F_{Ty} \\
 m(\dot{W} - UQ + VP) &= W_z + F_{Az} + F_{Tz} \\
 I_{xx}\dot{P} - I_{xz}\dot{R} - I_{zz}PQ + (I_{zz} - I_{yy})RQ &= L_A + L_T \quad (1) \\
 I_{yy}\dot{Q} + (I_{xx} - I_{zz})PR + I_{xz}(P^2 - R^2) &= M_A + M_T \\
 I_{zz}\dot{R} - I_{xz}\dot{P} + I_{zz}QR + (I_{yy} - I_{xx})PQ &= N_A + N_T
 \end{aligned}$$

**충돌 대상 정의**

충돌 대상 지형물은 그림 2와 같이 크게 세 가지로 분류해볼 수가 있는데, 각 경우에 따라 기동 초기에는 특정한 기동만이 가능한 경우도 있다. 예를 들면, 하강 때, 지상과의 충돌을 회피하기 위해서는 기동 초기에 풀업 명령 (pull-up command)을 주어 일단 고도 감소를 멈춘 이후에야, 상승선회와 같은 다른 기동을 명령할 수 있다. 지형물이 아닌 항공기 간의 충돌 경우에는 일반적으로 항공기 주위를 일정한 거리를 갖는 입체 공간으로 충돌 대상을 정의한다. 본 고에서는 향후 지형물이 아닌 항공기 간 충돌 문제로의 확장성을 고려하여, 그림 3과 같이 원기둥 형상의 가상 충돌 영역을 정의, 해석을 수행하였다.

**해석 조건**

초기 비행 조건은 고도 3km에서 400 km/h의 순항속도로 비행하는 945kg 중량의 스마트 무인기가 가정되었다. 편의 상 기준 시점 2초 후, 주어진 비행 운용 제한 범위 내에서 승강기, 예일러론 및 추진 동력을 조종하여, 표 1과 같은 대표적 5가지 기동 비행을 모사하였다. 이때, 더 큰 기동성능을 얻기 위하여 프롭로터의 조종력을 추가로 적용하는 방안이 있을 수 있으나, 프롭로터의 하중이 설계값을 초과할 것을 우려하여 본 해석에서는 고려하지 않았다. 그림 4는 표 1의 최대상승선회 기동의 주요 해석 결과를 보여주고 있다.

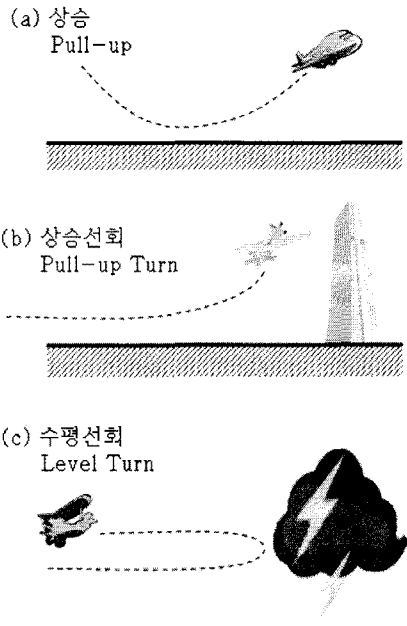


그림 2 지형물 충돌 회피의 예

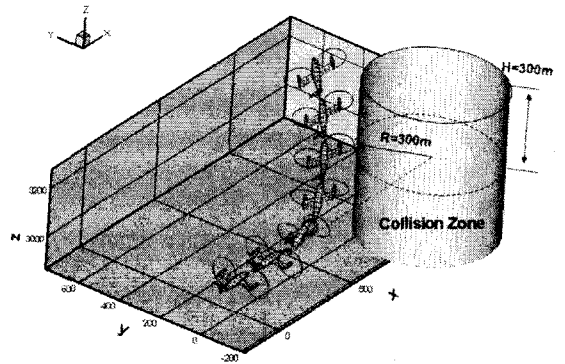


그림 3 충돌 대상 정의

**3. 해석 결과**

그림 5는 기준 시점 2초 후부터 표 1과 같은 5가지 기동 명령을 주어 예측된 비행 경로 및 자세를 매 2초 시간 간격으로 도시한 그림이다.

해석 결과, 최대상승기동(climb only)은 고속 수평 비행 조건에서는 충돌 회피에 효과적인 반면, 저속 수평 비행 조건에서는 실속 받음각의 제한으로 그 효과가 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. 주요 기동해석 조건

	기동	피치	롤
1	최대상승	최대	없음
2	상승선회	최대	적당
3	최대상승선회	최대	최대
4	수평선회	적당	최대
5	하강선회	없음	최대

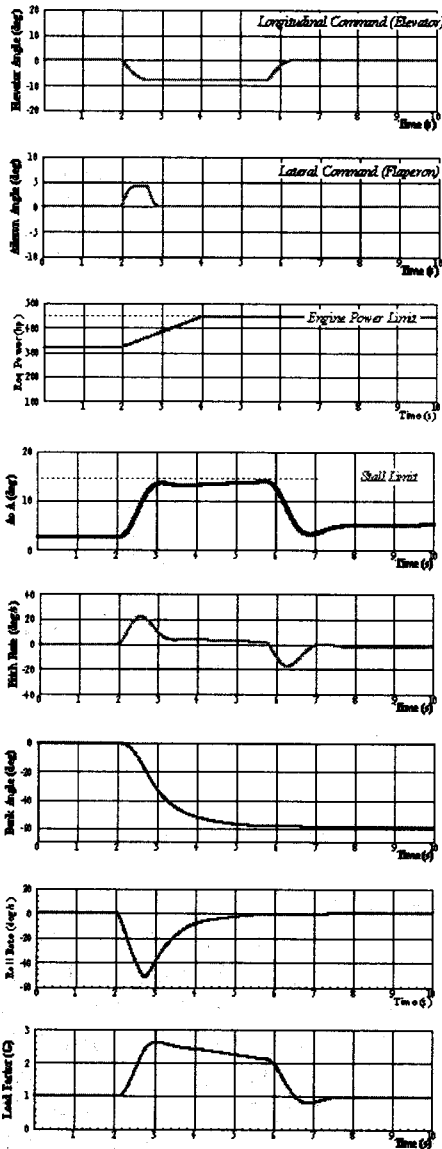
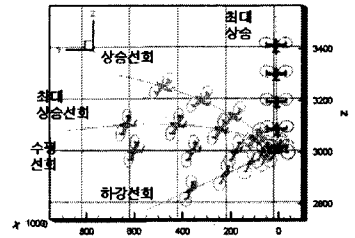
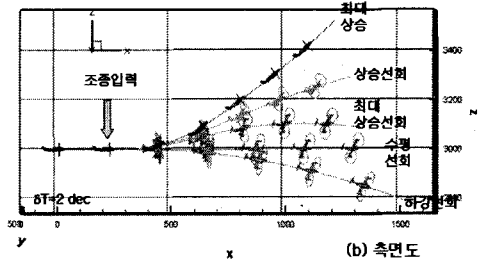


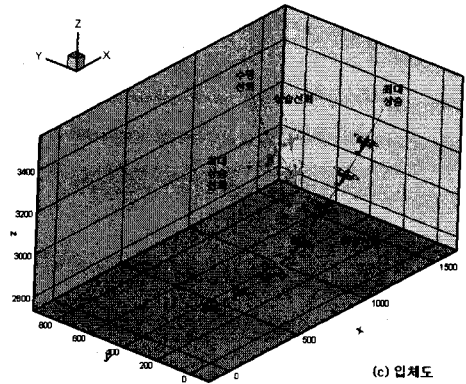
그림 4 최대 상승선회 기동 해석 결과



(a) 후면도



(b) 측면도



(c) 입체도

그림 5 스마트 무인기 충돌회피 기동경로

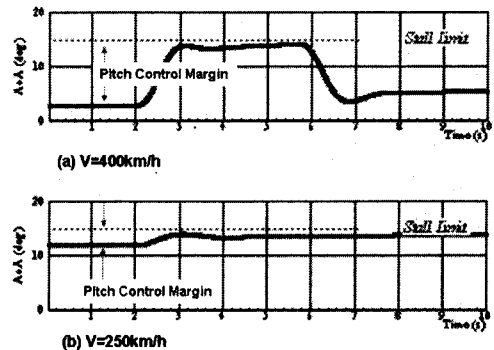


그림 6 저속비행조건에서의 피치기동 제한

그림 6은 시속 400km와 250km에서의 순항 조건에서 트림받음각으로부터 실속 받음각까지

의 피치조종여유를 보여주고 있는데, 250km/h 순항 조건에서는 상대적으로 피치 기동이 크게 제한됨을 알 수 있다. 이 때, 플랩을 이용하면 실속 최대받음각 증가하여 어느 정도 피치 기동성을 향상시킬 수 있다. 한편, 저속의 비행 조건이지만, 하강 조건에서는 트림 받음각이 상대적으로 작기 때문에, 저속 수평 순항 때와는 달리 큰 피치 기동이 가능할 수 있다.

그림 4, 그림 5의 최대상승선회기동은 승강기와 에일러론을 최대 가용한 속도 및 값까지 작동한 결과를 보여주고 있다.

조종면들의 최대 변위률은 30deg/s이며, 받음각은 실속각 15도로 제한되었다. 해석 결과, 기동 시 최대하중계수는 약 2.6을 보이고 있으며, 최대 피치 및 롤 변화율을 각각 20 deg/s, 40 deg/s 수준을 보이고 있다.

그림 5의 수평선회 기동은 최대동력으로 고도를 유지하면서 선회하는 기동으로, 실속 받음각의 제한이 있기 때문에 비행속도는 시간에 따라서 변화된다. 마지막으로 그림 5의 하강 선회는 승강기를 고정한 채, 에일러론을 이용하여 최대 롤 명령을 준 기동을 모사하고 있다. 일반적으로 하강선회 기동은 하강하면서 비행속도가 증가하기 때문에 다른 선회 기동에 비하여 회전반경이 크다.

그림 7은 그림 3의 충돌영역 정의에서 높이 H를 변화시키면서, 표 1의 5가지 기동에 대한 충돌회피시간을 비교 도시한 그림이다. 충돌영역의 가로세로비에 따라 충돌 회피 시간 특성도 달라짐을 알 수가 있다. 즉, 가로세로비 1의 충돌 영역을 가정할 때, 충돌회피시간은 최대상승선회기동이 가장 작은 값을 보이나, 가로세로비가 약 0.5 이하로 내려가면 충돌회피시간이 가장 작은 기동은 최대상승기동으로 나타난다. 이러한 결과는 항공기의 특성에 따라 정량적으로 달리 나타날 수 있지만, 정성적인 경향은 일치할 것으로 보인다. 한편 시속 250km의 저속 순항조건에서의 선회 기동은 400km/h 고속조건에 비하여 약 2초의 충돌회피시간 지연이 나타남을 확인할 수 있으며, 저속조건에서의 최대상승기동은 실속받음각 제한 때문에 고속의 같은 기동에 비하여 몇 배 이상의 충돌회피시간이 필요한 것으로 분석되었다. 참고로 충돌회피시간은 비행체 초기 출발점을 x방향으로 전진하면서 비행 궤적이 충돌 영역과 처음 만나는 지점까지의 시간을 의미한다.

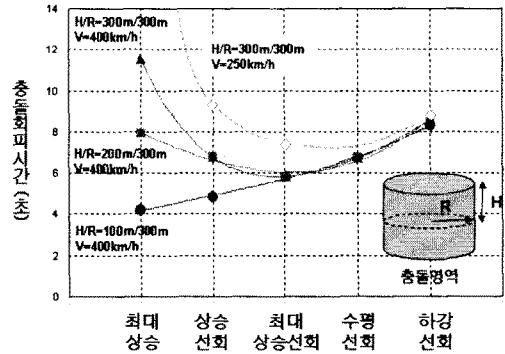


그림 7. 스마트 무인기 충돌회피 시간 비교

#### 4. 결론

스마트 무인기의 충돌회피기동성능이 6자유도 고정익 모드 시뮬레이션을 통하여 분석되었다. 지형물 뿐만이 아니라 향후 항공공간 충돌 분석에 대한 확장성을 고려하여, 충돌 영역을 원기동의 입체공간으로 설정하였다. 스마트 무인기의 기동 및 운용 제한 범위 내에서 가용한 조종 명령들의 조합으로 5가지 대표적 기동 비행을 모사하였다. 분석 결과, 충돌 영역의 형상과 초기 비행속도가 각 기동들의 충돌회피시간을 좌우하며, 충돌 영역의 높이가 상대적으로 작은 특정한 경우를 제외하면 일반적으로 최대상승선회기동이 가장 효율적인 충돌회피 기동이라고 말할 수 있다.

#### 후 기

이 연구(논문)은 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 기술개발사업(스마트무인기기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] AOPA, "Collision Avoidance : Strategies and Tactics", Safety Advisor, 2004
- [2] Heinz Erzberger, "The Automated Airspace Concept", 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2001