스마트 무인기 통신 가시선을 고려한 운용개념 연구

A Study on the Operation Concept of the Smart UAV considering Beam Shading Effect

안오성*, 김태식(한국항공우주연구원)

1. 서 론

스마트 무인기는 1톤의 이륙중량으로 수직이륙, 헬기보다 3배나 빠른 400km/h 이상의 고속순항비행, 5시간 이상 장기체공, 반경 200km의 임무운용거리를 갖는 비행체로 개발되고 있다. 운용고도는 5km 이상 비행도 가능한 성능 여유도를 갖고 있지만, 감지기 성능을 고려하여 반경 200km 내에서 통신가시선이 확보되는 해발 3km ~ 4 km 고도가 적정고도로 평가되었다.

중계기 없이 직접 통신이 200km 거리까지 가능한 최적의 통신 시스템을 설계하기 위해서는 중량증가를 최소화 하면서도 임무수행을 위한 다양한 항공기 자세에서 통신 가시선이 확보되도록 통신 시스템을 구성하는 것이 필수적이다.

본 연구는 비행고도 3km 기준으로, 스마트 무인기 통신시스템 구성 시 임무 반경이 장거리뿐 아니라 중, 단거리에서도 다양한 비행체 운용를 허용할 수 있도록 항공기 자세와 가시선의 관계를 분석하고, 체계관점에서 주, 부 통신 이양 및 지향성 안테나와 무지향성 안테나의 배치, 설계 요구도를 검토, 연구한 결과이다.

이 과정에서 주요하게 반영된 것은 참고문헌 [1] 의 안테나의 높이 및 비행체의 고도/거리에 따른 전파의 전파경로 및 입사각 특성이다. 위 문헌의 분석은 항공기 외부 장착물 또는 기체와의 간섭이 고려되지 않고 안테나와 지상 기지국의 통신신뢰도만을 고려한 것이다. 본 연구에서는 항공기 운용 요구도 및 공력성능 특성에 의한 자세각에 따른 외부 장착 물에 의한 간섭 영향과 운용개념의 영향 등을 체계 관점에서 고려한 것이다.

2. 본 론

2.1 스마트 무인기 통신 시스템 구성

스마트 무인기 통신 시스템은 Ku 대역 주파수를 이용한 주통신 장치와 극초단파(UHF)를 이용한 보조통신 장치로 2중화로 구성된다. 주통신 장치의 안테나 부는 다시 지향성 안테나와 2중의 무지향성 안테나로 구성되어 있고, 보조통신 장치의 안테나 역시 2중으로 구성되어 있다. 그림1은 스마트 무인기의 통신시스템구성을 보여주고 있다.

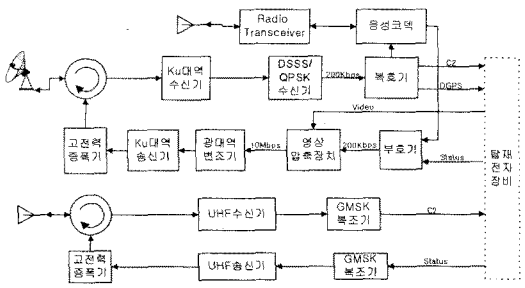
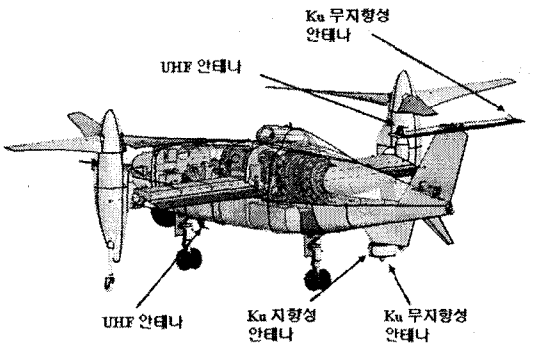


그림1. 스마트 무인기 탑재 통신 시스템 구성도

2.2 통신 안테나 장착 형상

그림2는 스마트 무인기 통신 안테나 장착 형상을 보여 주고 있다. 주통신 안테나와 보조통신 안테나는 간섭을 피하기 위해 서로 간에 거리를 두었고, 2중화한 안테나는 항공기 자세 및

방향의 변화 시 통신연결신뢰도를 높일 수 있는 위치를 고려하여 선정된 것이다.



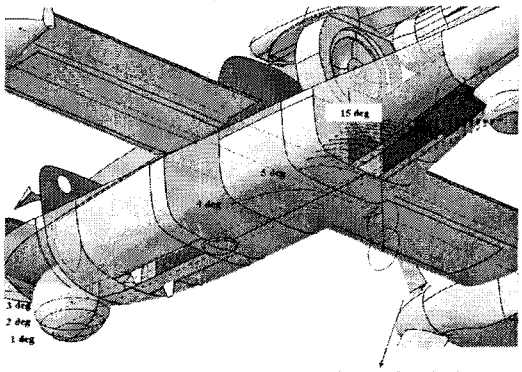
a) 스마트 무인기 탑재 통신안테나 배치

2.3 전파 쉐이딩 분석을 위한 항공기 운용 조건 정의

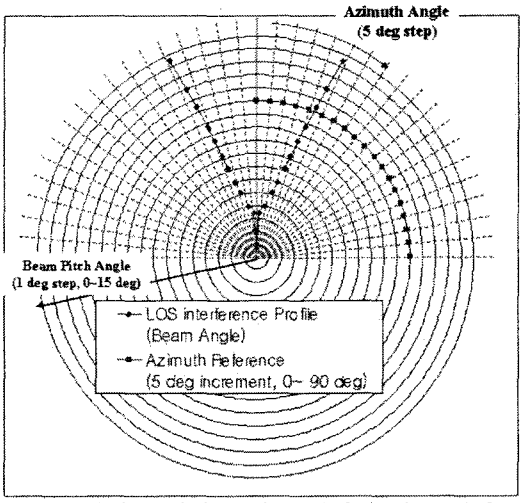
쉐이딩 영역 분석을 위해서는 우선 비행체의 운용조건 및 운용 자세각이 정의 되어야 한다. 우선 항공기 임무조건 정의에 있어서, 3km 상공에서 선회반경을 1km 로 하면, Bank각을 25도로 한 자세로 지속적으로 선회하여야 하므로 상대적으로 고받음각, 고항력, 연료소모 과다 등의 우려가 있어 감지기 성능을 감안하여 회전반경을 2km 수준으로 정하였다. 이 경우 비행체의 Bank 각도는 15도가 된다. 선회비행시 비행체의 속도는 250km/h 이고 피치각은 평균 8deg 수준이다. 스마트 무인기는 400 km/h로 순항할 수 있게 설계되었기 때문에 선회비행의 경우 피치각이 상당히 커져서 실속마진이 줄어든다. 이러한 문제를 해결하기 위해 선회비행시 플래퍼론을 10도 변위까지 양력증가를 위해 사용하여 가변캠버개념으로 날개를 운용하게 된다. 날개 전면 상단부에 Vortex Generator를 적용한 풍동시험 결과 플래퍼론 10도 처짐 경우 실속각도는 15도 수준으로서 선회비행시 충분한 마진이 있음을 확인할 수 있었다.

2.4 전파 쉐이딩 분석

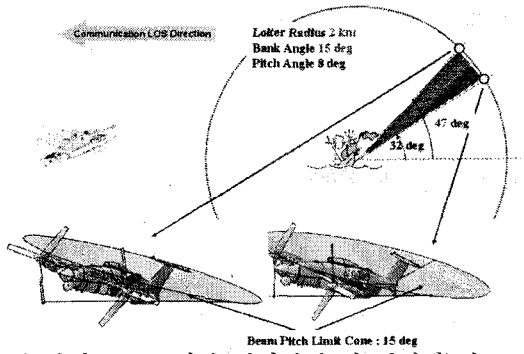
비행체의 운용 자세각과 외부 형상을 고려하여 쉐이딩 영역 분석을 수행하였다. 전파가 직선으로 전달된다는 가정하에 탑재안테나와 지상안테나 사이의 가시선(LOS, Light of Sight) 확보 유무를 기준으로 분석한 결과가 그림 3에 나타나 있다.



a) 외부장착물 및 장착형상에 의한 간섭



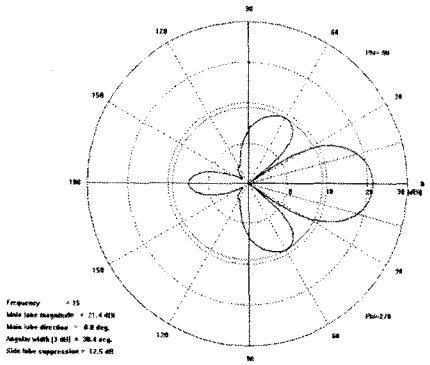
b) 비행체 수평비행 시 방위각에 따른 전파 쉐이딩 영역



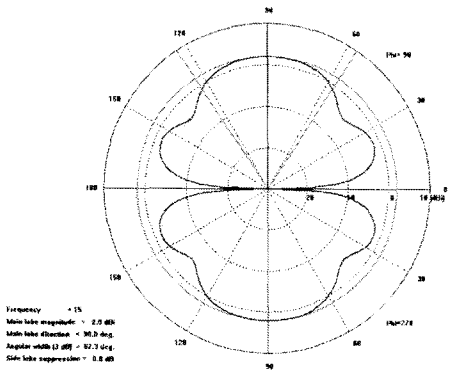
c) 반경 200km에서 선회비행 시 위치에 따른 전파 쉐이딩 영역 (전파입사각 0도 가정)

그림3. +/-15 도의 빔폭과 전파의 직진성, 운용자세를 고려한 가시선 분석결과

위 분석결과 200km에서 국부적인 통신간섭이 있을 것으로 판단되었다. 15도 Bank 선회기동 시 간섭이 일어나는 부위는 낫셀 하단면으로서 아주 가까스로 간섭이 일어났다. 이는 선회반경을 증가시켜 Bank 각도를 1도만 줄여주어도 해결되지만, 감지성능 손실이나 공력성능의 손실을 감수하는 비행체 운용개념 변경이나 설계 변경 즉, 선회반경증가 또는 지향성 안테나 장착대 높이를 증가시키는 결정을 하기에 앞서서 보다 상세한 전파의 전파특성을 검토할 필요가 대두되었다. 첨부문서[1]이 그 연구 결과이다. 지향성 안테나와 무지향성 안테나의 수직방향 빔 출력 분포특성은 그림4와 같다.



(a) 지향성 안테나 수직 빔 분포



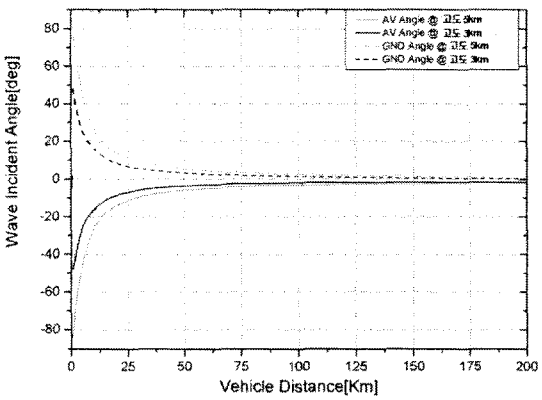
(b) 무지향성 안테나 수직 빔 분포

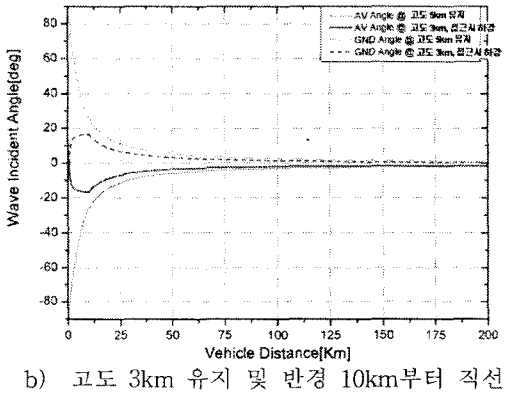
그림4. Ku-대역 안테나의 수직빔 분포

지향성 전파의 빔폭 +/- 15deg은 전파 출력의 감쇄가 3db 수준으로 발생하는 것을 기준으로 한 것이다. (그림4. a 의 푸른색 경계 참조)

위와 같은 수직빔 분포 특성뿐 아니라, 장거리 통신의 경우 공기중의 유전율 차이로 인해 전파의 굴절이 발생되는 현상을 감안한 전파 입사각 분석을 수행한 결과 그림5와 같은 고도 및 거리에 따른 입사각이 도출되었다.[1]

a) 고도3km, 5km 유지 기준





b) 고도 3km 유지 및 반경 10km부터 직선 강하 가정기준 (고도 5km 경우는 계속 유지)

그림5. 전파 굴절 및 거리에 따른 탑재 및 지상안테나의 전파 입사각 분석

2.5 전파입사각 특성에 따른 쉐이딩영역 변화

그림6은 전파 입사각 분석 결과 요약이다.

거리	탑재 전파 입사각[deg]	
	고도 5Km	고도 3Km
5Km	-44.997	-35.00
10Km	-26.583	-16.72
15Km	-18.474	-11.351
25Km	-11.387	-6.921
50Km	-5.875	-3.599
100Km	-3.198	-2.054
150Km	-2.414	-1.651
200Km	-2.105	-1.533

그림6. 거리에 따른 전파 입사각 도표

위 분석결과를 반영하면 그림3-c 에 나타낸 항공기 외형에 의한 전파의 쉐이딩 영역은 존재하지 않게 된다. 또한 지향성안테나는 위 입사각 분석을 기초로 하여 100km 반경에서 전파와 수직으로 만나는 각도로 기준으로 안테나 회전면의 기울기를 아래로 조정하여 통신 효율을 높이도록 설계를 진행하고 있다. 즉, 안테나의 회전면은 수직축에 대하여 2도 아래 방향으로 기울여 설계를 진행하고 있다.

2.6 전파 입사각 특성 및 비행체 운용조건에 따른 통신 신뢰도

스마트 무인기의 통신 신뢰도 요구도는 95% 이다. 거리에 다른 전파의 입사각 특성과 안테나 회전면 기울임각을 감안하여 200km 반경에서 15도 선회비행시 95% 신뢰도를 기준으로 감쇄마진 (Fading Margin)을 분석한 결과는 그림 7 과 같다. 분석에는 항공기 장착케이블의 길이에 비례하는 손실을 1.5db 적용하였다. (15 GHz 시 1db/m 수준)

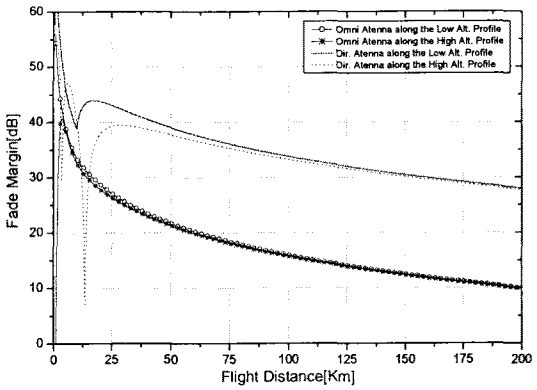


그림 7. 스마트 UAV 통신링크의 성능분석 결과[1]

200km 반경에서 감쇄마진은 28db 수준이다. 여기에 대기에 의한 경로손실 11db (60% 습도 대기조건 해당)를 고려하면 17db 의 마진을 확보한 셈이다. 고도3km, 200km 반경의 통신시스템 설계시 반사파를 고려한 다중경로 손실과 통신시스템 자체제작성능저하를 고려한 요구마진은 20db 수준을 예상하고 있다. 따라서 약 3db 수준의 추가적인 마진 확보가 필요하다. 다중경로 손실은 보수적으로 예측 시 11db 수준이므로(참고문헌 1의 예측 12db,에서 속도조건 250km/h 와의 차이로 인한 보상 1db 적용) 제작성능저하마진은 6db (= 17db - 11db) 수준으로 확보되어 있다고 볼 수 있다. 중량 및 전력소요 증가 부담이 있는 고출력증폭기의 성능증가 없이 추가적인 마진 확보를 위한 방안으로서 Ku-Band 하향링크의 데이터 전송율을 기본값인 10.7Mbps에서 선택적으로 2Mbps로 바꾸는 기능을 추가하는 개념이 제안되어 스마트무인기 통신시스템 설계에 적용되고 있다. 즉, 데이터 전송율을 1/5로 줄이면 출력은 7db (=10log(5)) 커진다. 따라서 전송율 조절로 추가 확보되는 마진을 포함하면 60% 습도기준 총 하향링크 마진은 24db (= 17db + 7db) 가 되고, 제작성능저하 마진은 13db (= 24db - 11db : 다중경로손실) 가 된다.

2.7 제작성능저하 마진과 운용대기환경 마진

스마트무인기 통신시스템 설계 규격서에는 주요 단품 수준의 출력 요구 사양이 정의되어 있으나, 탑재통신시스템의 제작성능저하를 감안한 최소허용출력성능이 정의되어 있지 않다. 이 요

구도가 구체적으로 정의되어야 스마트무인기를 운용할 수 있는 대기환경 조건에 대한 보다 구체적인 예측이 가능하다. 그림8은 강우조건 및 주파수 대역에 따른 통신 감쇄율을 나타낸다.

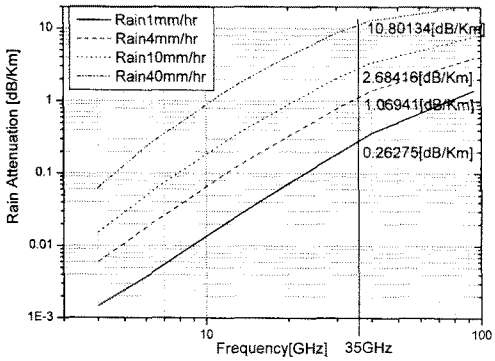


그림8. 강우조건 및 주파수 대역에 따른 통신 감쇄율

각 강우 조건에 대한 기상현상은 다음과 같다.
- 1mm/hr : 가벼운 비 정도, 봄비
- 4mm/hr : 중간정도 비, 봄가을에 흔한 비
- 10mm/hr : 소나기
- 40mm/hr : 국지성 폭우 (산골짜기 폭우)

Ku 통신 주파수 대역인 15GHz 영역에서 각각의 강우조건에 대한 감쇄율은 다음과 같다.

- 1mm/hr : 0.0368dB/Km
- 4mm/hr : 0.17336dB/Km
- 10mm/hr : 0.48289dB/Km
- 40mm/hr : 2.27484dB/Km

탑재 통신시스템의 제작성능저하를 5db 이하로 제작한다면 4mm/hr의 강우가 50km 거리에 걸쳐 내리는 기상조건에서도 200km 반경에서 95% 신뢰도의 통신이 가능하다고 할 수 있다. 이와 같은 운용상의 이득을 현실화 하기위해 탑재통신 시스템 단위의 제작성능저하를 보장할 수 있는 요건을 체계규격서에 명시/합의 및 제품보증에 관한 기술적 관리 노력이 향후과제로서 요구된다.

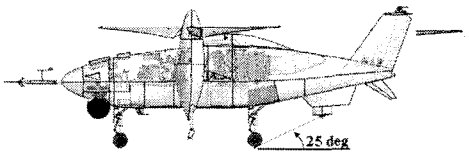
2.8 지향성 안테나와 무지향성 안테나 전환 기준반경

그림7에 나타난 바와 같이 반경 16km 이하에서는 지향성 안테나의 감쇄마진이 급격히 떨어지는 현상을 확인할 수 있다. 이는 그림 4-a 에 나타낸 바와 같은 지향성 안테나의 수직방향에 따른 전파 출력 특성과 거리에 따른 입사각 특성 때문이다. 따라서 마진을 감안하여 반경 25km 이하에서는 무지향성 안테나를 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다. 현재 적용된 무지향성 안테나는 반경 50km까지 통신이 가능하다.

2.9 기지국 접근 및 착륙 조건에서의 통신가시선 확보를 위한 운용영역

스마트 무인기는 그림9에 나타낸 바와 같이 착륙을 위해 회전익 모드로 전환이 끝난 뒤 착륙장치를 펼치게 된다. 이렇게 되면 착륙장치에 의해 통신 가시선이 가려지게 되는데 가려지는 각도는 전방 25도 이다. 이러한 문제는 그림5-a 와 그림5-b의 입사각 차이 현상에서도 확인할 수 있다. 따라서 착륙접근 시 비행체가 정면으로 접근하는 경우, 고도가 낮아져서 지상과 탑재 안테나의 각도가 25도 이하가 되지 않도록 운용영역을 정의하여야 한다. 즉, 그림9-c 에 나타낸 바와 같이 순항고도 3km를 유지하며 반경 5 km 이내로 들어온 뒤에야 착륙접근을 위한 하강을 시작하여야 한다.

a) 회전익 모드에서 정면도 (TR-S4)

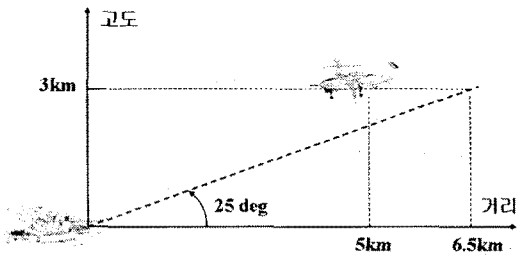


b) 회전익 모드에서 측면도와 쉐이딩 각도 (무지향성 안테나 기준)

c) 착륙장치에 의한 전파 가시선 간섭을 고려한 착륙 접근 운용 제한영역

그림9. 착륙조건에서의 비행체 쉐이딩 영역과 착륙접근 운용 제한영역

반경 5km 이내에서 착륙접근 시나리오는 보다 면밀한 가시선 간섭에 의한 전파 감쇄 분석



과 배의 최대 전진속도를 감안한 회전익 모드에서의 적정 접근 속도 등을 고려하여 향후에 분석/정의되어야 할 과제이다.

3. 결론

본 연구는 스마트 무인기의 임무운용 조건에서 공력성능, 외형형상특성, 전파의 전파특성 등을 감안하여 통신 쉐이딩 영역을 검토하였고, 감쇄마진 대비 운용대기 환경과 제작공차의 관계를 파악하여 향후 탑재통신시스템 기술관리 지표를 도출하였으며, 근거리 착륙 접근 비행에서 통신 가시선 확보를 위한 운용 영역을 정의하였다.

현재 스마트 무인기의 통신시스템 구성 성능과 안테나 장착 형상, 그리고 운용개념 및 기준 운용 조건을 고려할 때, 임무영역 내에서 안정된 통신이 가능함이 확인되었다.

참고문헌

[1] 김태식외, "스마트무인기 통신링크 체계설계 및 운용성 분석" 한국통신학회 추계종합학술대회, 2004.11

[2] 김태식외, "무인비행선 통신시스템 설계 및 링크 성능분석," 한국항공우주학회 추계학술대회, 2002

[3] 김봉경외, "Smart-UAV를 위한 Ku-대역 탑재영상 송수신시스템의 설계 및 해석," 한국통신학회지 Vol.29 No.7A, 2004

[4] Bernard Sklar, "Digital Communications, Fundamental and Applications," Prentice Hall, 1988

[5] Rodger E. Ziemer, "Introduction to Communication Systems," Prentice Hall, 2001

[6] Paul Rohan, "Introduction to Electromagnetic Wave Propagation," 1991