

혼 반사기를 적용한 UAV용 패치배열 안테나 설계

Design of Patch Array Antenna for UAV with Horn Reflector

김 성 훈 · 고 지 환*

금오공과대학교 전자공학과

Seong-hun Kim · Ji-hwan Ko*

School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

[요 약]

본 논문에서는 패치배열안테나에 혼 형상의 반사기를 적용하여 넓은 빔 폭을 형성하는 안테나를 연구하였다. 넓은 빔 폭을 구현하기 위해 정사각형 마이크로스트립 기판 상의 4개 방면에 3개의 패치들을 각각 배열하였고, 배열안테나 후방에 혼(Horn) 형상의 반사기를 각각 적용하였다. 이 구조를 통해 패치로부터 형성된 수직 빔 패턴이 사선 방향으로 변환되었고 결과적으로 네개의 섹터에서 형성된 각각의 빔 폭이 더해져서 반구형에 가까운 넓은 빔 폭을 만들 수 있었다. 제안된 안테나는 UAV(unmanned aerial vehicle)에 적용하기 위해 연구되었고 모의시험결과, 4.5 dBi 빔 폭이 146.8°임을 확인하였다.

[Abstract]

In this paper, we studied an antenna that forms a wide beam width by applying a horn-shaped reflector to a patch array antenna. To implement a wide beam width, three patches were arranged in each of the four directions on a square microstrip substrate, and a horn-shaped reflector was applied to the rear of the array antenna. Through this structure, the vertical beam pattern formed from the patch was converted to a diagonal direction, and as a result, the beam widths formed in each of the four sectors were added to create a wide beam width close to a hemisphere. The proposed antenna was studied for application to UAV(unmanned aerial vehicle), and the simulation test results confirmed that the 4.5 dBi beam width was 146.8°.

Key word : Horn reflector, Modified Wilkinson power divider, Patch array antenna, UAV, Wide beam coverage

<https://doi.org/10.12673/jant.2023.27.6.828>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 29 November 2023; **Revised** 14 December 2023
Accepted (Publication) 18 December 2023 (29 December 2023)

*Corresponding Author : Ji-hwan Ko

Tel: +82-54-478-7504

E-mail: kojh@kumoh.ac.kr

1. 서론

무인항공기(UAV; unmanned aerial vehicle)는 비행기나 헬리콥터 형상의 플랫폼으로 운용되고 있다. 초창기 UAV는 군사적 목적으로 개발되었고 주로 표적획득, 정찰 및 감시용으로 활용되었으나 최근에는 화력유도, 공격, 기만, 전자전 지원 등으로 활용 범위가 확대되고 있고 최근 전장에서는 게임 체인저로서 그 역할과 중요성이 급증되고 있다. UAV는 지상 제어장치 또는 위성으로부터 전파를 송수신하여 조종 및 제어되지만 주파수 대역이나 관련 법안들은 국가마다 상이하다. 이에 국제전기통신연합(ITU; international telecommunication union) 산하의 세계전파통신회의(WRC; world radio conference)에서는 UAV에 대한 제어용 주파수의 요구사항 및 신규 분배를 논의하였고 마침내 지상에서 UAV 제어를 목적으로 하는 항공 이동업무용 주파수를 5.030~5.091 GHz 대역으로 신규 분배하였다(WRC-12, 2012년) [1]. 우리나라도 WRC-12에서 할당된 대역을 국내에서 이용할 수 있도록 ‘항공 업무용 무선설비의 기술기준’을 국립전파연구원에서 개정하였고 UAV의 출력을 기존의 10 mW에서 10 W까지 허용하는 등 유관산업 활성화를 위해 노력하고 있다[2].

본 연구는 지상 제어장치로 UAV를 조종하는 경우 UAV에 적용할 수 있는 안테나에 관한 것으로써 최근 연구 자료를 통해 UAV 안테나의 특성을 확인하면, 우선 UAV 안테나는 지상 제어장치와의 원활한 통신을 위해 가능한 한 넓은 가시선(LOS; line-of-sight) 영역을 확보해야 하고 따라서 안테나의 방사패턴은 반구형과 유사하다. 연구에 의하면 교외지역(suburban), 도심지(urban), 고밀도 도심지(dense urban), 및 고층빌딩 밀집 도심지(high-rise urban)에서 지상 제어장치와 UAV의 통신가능 빔 폭은 각각 139.32°, 95.12°, 70.76° 및 28.96° 이다[3]. 또 다른 연구에서는 앞에서 언급한 네가지 도시 모델에 대해 최적 고도에서의 최대 전파수신 영역을 연구하였다. 결과에 의하면 교외지역의 경우 최적 고도 1,450 m에서 최대 셀 반경은 대략 3,350 m이고 이는 빔 폭 133.2°에 해당하며[4], 참고문헌[3]의 결과인 139.32°도와 유사하다. 두번째, 일부 UAV의 경우 앞서 언급한 것 처럼 수 km의 고도에서 수 km의 운용 반경을 가진다. 이런 목적에 부합하는 안테나는 넓은 빔 폭과 높은 이득을 가져야 하는데 두 파라미터는 반비례 관계이다. 예를 들어, UAV용 2차원 안테나들 중 넓은 방사패턴에 비해 낮은 이득(2.5~2.6 dBi)을 가지는 사례[5]-[6]가 있고, 이득은 4.5 dBi로 다소 높으나 방사패턴이 반구형에 미치지 못하는 경우도 있다[7]. 이런 이슈를 해결하고자 3차원 구조의 안테나들이 연구되고 있고 결과적으로 방사패턴과 이득은 UAV 운용에 부족함이 없는 것으로 확인된다. 다만, 입체적인 구조로 인한 상대적인 복잡함, 예를 들어 빔 패턴을 만들기 위해 적용된 입체적인 구조 및 복잡한 스위칭 회로 등은 개선이 필요한 부분이다[8]-[13]. 세번째, 평면 안테나들을 조립하여 입체적인 안테나를 설계하는 경우

이득은 안테나 형상에 좌우된다. 일부 연구의 경우 입체적인 안테나에 평면형 반사기의 면적을 증가시켜 이득을 개선한 경우[13]가 있는 반면, 평면 안테나에 혼 형상의 구조물을 적용하여 안테나의 소형화, 격리도 및 이득을 증가시킨 사례도 있다[14]-[15]. 네번째, 3차원 구조의 안테나는 360도 방위각을 커버하기 위해 45°[8], 60°[9], 또는 90°[10] 간격으로 안테나를 배치하여 빔 폭을 넓게 만든다. 이런 경우 각각의 안테나에 전력을 공급하기 위해 동축 케이블을 이용하거나 T-Junction 또는 윌킨슨 전력 분배기(WPD; Wilkinson power divider)를 사용하는데 포트 별 매칭, 포트 간 격리도 및 배열 소자간 커플링 등에서 윌킨슨 전력 분배기가 좋은 선택이 될 수 있다[16].

본 논문은 UAV에 적용할 수 있는 3차원 구조의 안테나 설계에 관한 것으로써 제안된 안테나는 WRC-12에서 할당된 5.030 ~ 5.091 GHz 대역을 사용하였다. 안테나는 정사각형 인쇄회로기판 상의 네 방면에 세계의 사각 패치들을 각각 배열한 후 수정된 WPD로 전력을 공급하고 혼 형태의 반사기를 장착하여 구현하였다. 제안된 안테나는 Rogers 4350B 기판(상대유전율 3.48, 기판 두께 0.76 mm)으로 모델링 되었고 시뮬레이션을 통해 4.5 dBi의 빔 폭이 146.8°임을 확인하였다. 안테나의 설계, 모델링 및 시뮬레이션은 CST MWS로 수행하였고 결과를 통해 제안된 안테나는 혼 반사기에 의해 형성된 넓은 빔 폭과 적합한 이득 때문에 지상 제어장치와 원활한 통신이 가능할 것으로 예상된다.

II. 안테나 설계

2-1 안테나 급전선 설계

그림 1은 일반적인 WPD와 수정된 WPD[17]를 각각 보여준다. 본 연구에서는 설계의 장점이 있는 수정된 WPD를 적용하였고 인쇄회로기판 네 방면의 중심으로 향하도록 설계하기 위해 전체 급전선로를 45°로 기울였다. 입력임피던스 Z_0 (=50 Ω)와 분기된 임피던스 Z_0 (=50 Ω) 사이의 정합을 위해 35.35 Ω의 QWT(quarter wave transformer)를 적용하였고 분기된 50 Ω 선로의 길이는 $3\lambda_g/4$ 로 설계하였다. 임피던스 별 선로 폭 및 길이는 50 Ω의 경우 폭은 1.66 mm, $\lambda_g/4$ 길이는

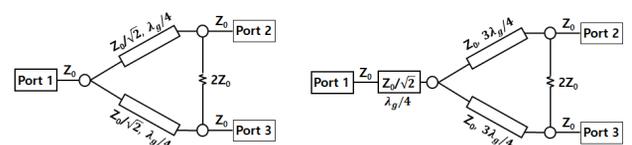


그림 1. 윌킨슨 전력분배기(좌: 일반형 WPD, 우: 수정된 WPD)
Fig. 1. Wilkinson power divider(left: typical WPD, right: modified WPD).

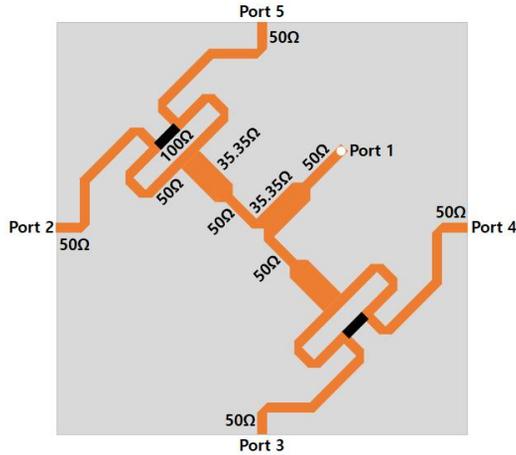


그림 2. 수정된 WPD 및 급전선 설계
 Fig. 2. Design of a modified WPD and feed line.

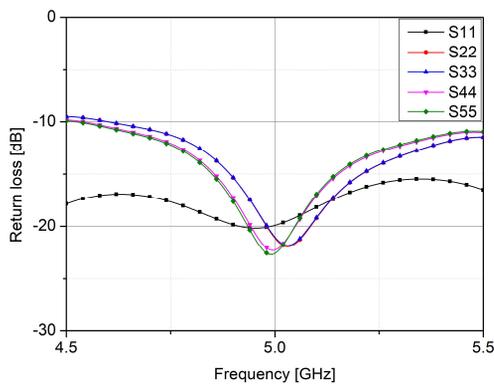


그림 3. 포트 별 반사손실 모의시험 결과
 Fig. 3. Simulation result of the return losses for each port.

8.8 mm 이고 35.35 Ω의 경우 폭은 2.8 mm, $3\lambda_g/4$ 길이는 25.8 mm 이며 모의시험을 위한 모델링 및 시험 결과는 그림 2와 그림 3에서 각각 보여준다.

2-2 패치 안테나 및 임피던스 변환기 설계

패치 배열안테나와 급전선의 임피던스 정합을 도식화하면 그림 4와 같다.

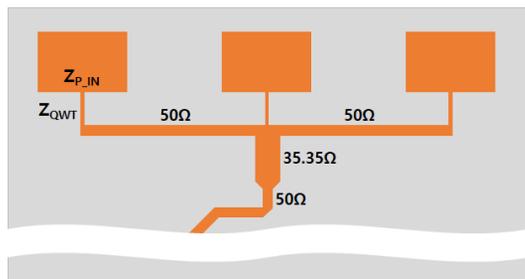


그림 4. 급전선과 패치 사이의 임피던스 매칭
 Fig. 4. Impedance matching between patch and feed line.

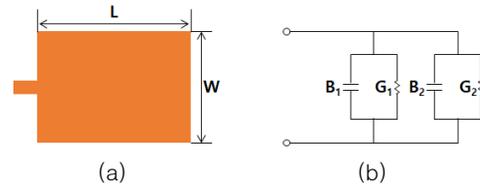


그림 5. 마이크로스트립 사각 패치: (a) 전체 형상, (b) 전송선로 등가 모델
 Fig. 5. Rectangular microstrip patch: (a) whole structure, (b) transmission model equivalent.

그림 4의 Z_{QWT} 는 전송선로와 패치안테나를 정합시키기 위한 QWT로써 Z_{QWT} 의 임피던스를 구하기 위해서는 Z_{P_IN} 을 구해야 한다. Z_{P_IN} 은 패치안테나의 입력임피던스로 그림 5(b)와 같이 전송선로 등가 모델로 도식화 할 수 있다.

그림 5(b)에서 두개의 슬롯은 각각 B_1, G_1 및 B_2, G_2 로 표기되고 식 (1)을 통해 구할 수 있으며 상호 동일한 값($B_1=B_2, G_1=G_2$)을 가진다. 공진상태에서는 허수부가 상쇄되므로 패치 안테나의 입력임피던스는 식 (2)를 통해 계산되고 그 값은 183.34 Ω이 된다.

$$G_1 = \frac{W}{120\lambda_0} \left[1 - \frac{1}{24}(k_0h)^2 \right], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10} \tag{1}$$

$$B_1 = \frac{W}{120\lambda_0} [1 - 0.636 \ln(k_0h)], \quad \frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{10}$$

$$Z_{in} = \frac{1}{Y_{in}} = R_{in} = \frac{1}{2G_1} \tag{2}$$

여기서, 식(1)의 W는 패치 폭, k_0 는 파수, h는 기판 높이를 각각 나타낸다.

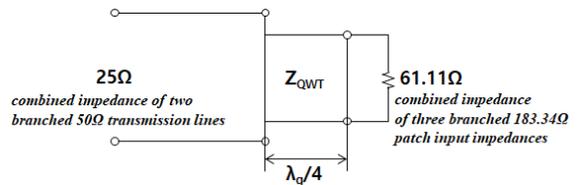


그림 6. 급전선과 패치 사이의 QWT 등가회로
 Fig. 6. Equivalent circuit of QWT between feed lines and patches.

그림 6은 전송선로와 임피던스 변환기 및 패치안테나의 관계를 도식화 한 것으로써 Z_{QWT} 는 합성된 전송선로 임피던스와 패치 입력임피던스를 통해 구할 수 있고 그 값은 39.08 Ω이며 따라서 각각의 패치와 전송선로를 정합하기 위한 QWT의 임피던스는 $117.24 \Omega (=39.08 \Omega \times 3)$ 이 된다.

2-3 2차원 패치 배열안테나 설계

지금까지 설계된 파라미터들을 이용하여 인쇄회로기판 상에 패치 배열안테나를 구현하면 그림 7과 같고 모델링된 안테

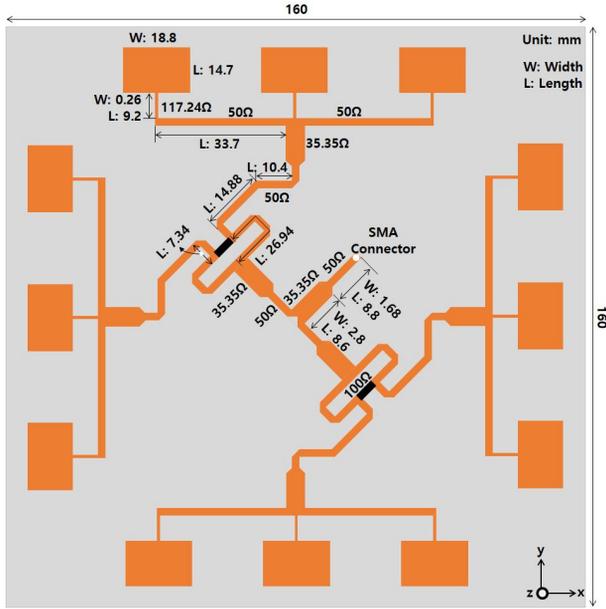


그림 7. UAV용 2차원 패치 배열안테나 설계
 Fig. 7. 2-dimensional patch antenna array design for UAV.

나의 반사손실 및 방사패턴은 그림 8과 그림 9에서 확인된다. 그림 8을 통해 설계된 안테나의 중심주파수는 5.05 GHz이고 10 dB 반사손실 대역폭은 5.0~5.092 GHz 이며, 따라서 WRC-12의 대역폭을 충족한다.

그림 9는 2차원 패치 배열안테나의 방사패턴 결과를 각각 보여준다. 본 연구에서는 4.5 dBi 빔 폭이 140° 이상 되는 것이 목표인데 모의시험 결과, 최고 이득은 10.1 dBi이고 4.5 dBi 빔 폭은 대략 101.1°(-51.4° ~ 49.7°)이다. 이는 연구 목표 보다 대략 39° 작은 값으로, 이를 개선하기위해 혼 형태의 반사기를 각각의 패치 배열 뒤에 설치하였고 이를 통해 수직으로 형성되는 방사 패턴을 사선 방향으로 변환시킬 수 있을 것으로 예상된다.

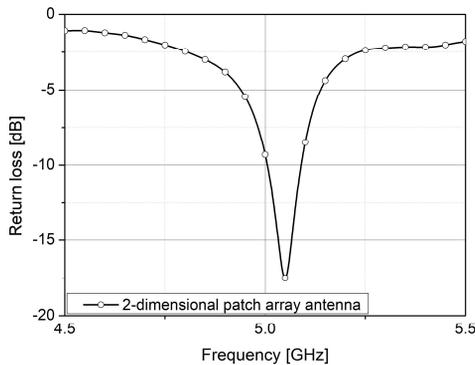


그림 8. UAV용 2차원 패치 배열안테나의 반사손실
 Fig. 8. Return loss of 2-dimensional patch antenna array for UAV.

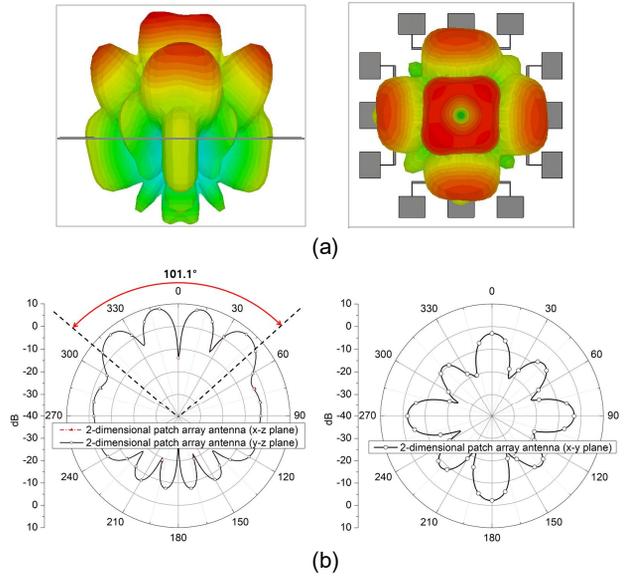


그림 9. UAV용 2차원 패치 배열 안테나의 방사패턴: (a) 3D 방사패턴, (b) 2D 방사패턴(좌: x-z 및 y-z 평면, 우: x-y 평면)

Fig. 9. Radiation pattern of 2-dimensional patch antenna array for UAV: (a) 3D radiation pattern, (b) 2D radiation pattern(left: x-z and y-z plane, right: x-y plane).

2-4 혼 반사기 적용 패치 배열안테나 설계

2차원 패치 배열안테나의 빔 폭을 증가시키기 위해 혼 형태의 반사기를 연구하였고 최초 형상은 그림 10과 같다. 혼 구조는 육면체 중 전파를 내보내는 개구면을 제외한 나머지 면이 금속으로 둘러싸인 도파관으로써 금속 관 내에서 형성된 전파들은 반사면을 따라 개구면으로 방사되기 때문에 높은 지향성을 가진다. 그림 10의 반사기는 안테나 구조를 단순화하기 위해 뒷면을 제외한 후방면 및 측면만 금속 판을

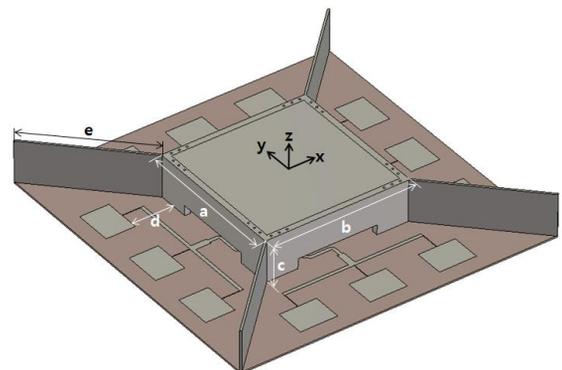
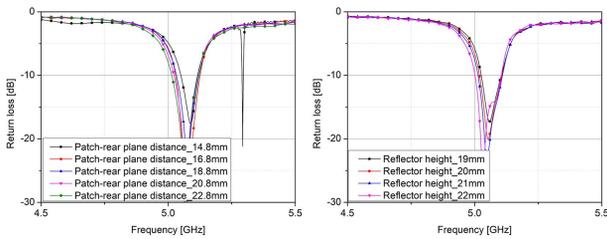
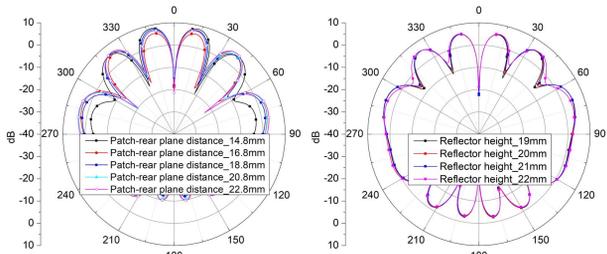


그림 10. 후방면 및 측면 반사판이 적용된 패치 배열안테나
 Fig. 10. Patch array antenna applied for reflectors consisting of rear and side electric walls.



(a)



(b)

그림 11. 혼 반사기 첫번째 모델 최적화: (a) 반사손실(좌: 패치-후방면 사이의 간격, 우: 반사기 높이), (b) 방사패턴(좌: 패치-후방면 사이의 간격, 우: 반사기 높이)
Fig. 11. Optimization of the first model of horn reflector: (a) return loss(left: patch-rear plane distance, right: reflector height), (b) radiation pattern(left: patch-rear plane distance, right: reflector height).

표 1. 후방면과 측면 반사판이 적용된 패치배열안테나 최적화
Table. 1. Optimization of the patch array antenna with rear and side reflecting planes.

parameter	optimized result	4.5 dBi beam width (y-z plane)	bandwidth [dB]
patch-rear plane distance	22.8 mm	-43.3°~+43.5° (86.8°)	5.01~5.11 (101.3 MHz)
reflector height	22.0 mm	-42.2°~+43.7° (85.9°)	5.02~5.10 (83 MHz)

적용한 것으로 육면체의 가로 a와 세로 b는 각각 85.08 mm로 동일하고 높이 c는 도파관 WR187(운용주파수 3.95~5.85 GHz, 차단주파수 3.2 GHz)의 22.15 mm를 참고하여 22.0 mm를 적용하였다. 패치와 육면체의 수직면 사이의 간격 d는 설계 중심주파수인 5.06 GHz의 $\lambda_0/4$ 되는 14.8 mm를 최초로 적용하였고 이 후 간격 d와 높이 c를 조정하면서 최적화를 수행하였다. 마지막으로 측면 반사면의 길이는 64.7 mm로, 높이는 c와 동일한 값으로 각각 설계하였다. 모의시험을 통해 최종적으로 간격(d) 22.8 mm, 높이(c) 22.0 mm에서 최적화된 결과를 얻었고 그림 11 및 표 1에서 확인할 수 있다.

후방면과 측면만 금속판으로 설계한 반사기의 모의시험 결과, 표 1의 내용처럼 y-z 평면상에서 4.5 dBi 빔 폭은 대략 86.8°로 이는 목표 빔 폭인 140° 보다는 53.2°, 2차원 패치 배열 안테나 보다는 대략 14.3° 작은 값이다. 즉, 패치 후방면 및 측면에 적용된 반사판만으로는 패치에서 수직으로 방

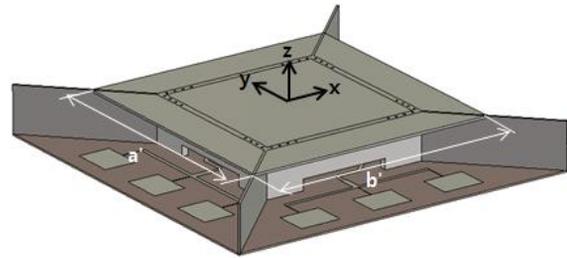


그림 12. 혼 반사기 첫번째 모델 윗면 면적 증가 모델링
Fig. 12. Modeling of an increasing top plane area of the first horn reflector.

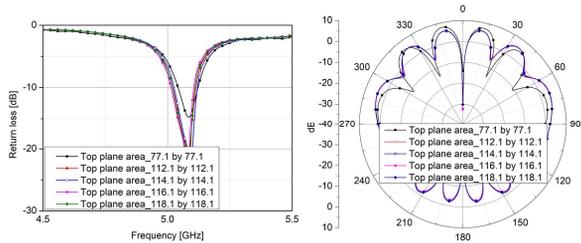


그림 13. 윗면 면적 증가에 대한 혼 반사기 패치 배열안테나 모의시험 결과(좌: 반사손실, 우: 방사패턴)
Fig. 13. Simulation results of the horn reflector patch array antenna with an increasing top plane area(left: return losses, right: radiation patterns).

사되는 전파 방향을 목표 방향으로 변환시킬 수 없다. 이를 해결하고자 최초 반사기의 윗면을 점점 증가시키면서 모의시험을 수행하였다. 모델링에 적용된 값을 그림 10의 파라미터로 나타내면 a=b=77.08 mm, c=21.0 mm, d=18.8 mm 및 e=58.6 mm 이고 완성된 안테나는 그림 12에서 보여주며 모의시험 결과인 10 dB 반사손실과 방사패턴은 그림 13에서 각각 보여준다. 모의시험 결과, 면적(a' × b')이 114.1 × 114.1 mm² 일 때 최적화된 결과를 얻었다. 윗면 면적의 끝 부분과 패치의 시작부분의 수평 거리차는 대략 0.3 mm이고 윗면과 패치면적이 겹칠수록 안테나 성능은 상대적으로 열화된다. y-z 평면상에서 4.5 dBi 빔 폭은 대략 146.8°이고 10 dB 반사손실 대역폭은 5.02~5.12 GHz (100 MHz) 이다.

2-5 제안된 안테나 형상, 성능 및 UAV 장착 예상도

제안된 안테나의 최종 형상은 그림 14에서 보여준다.

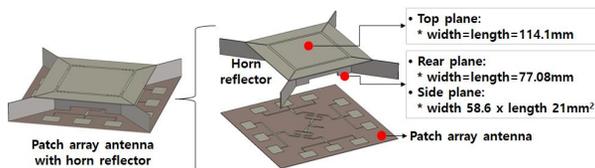
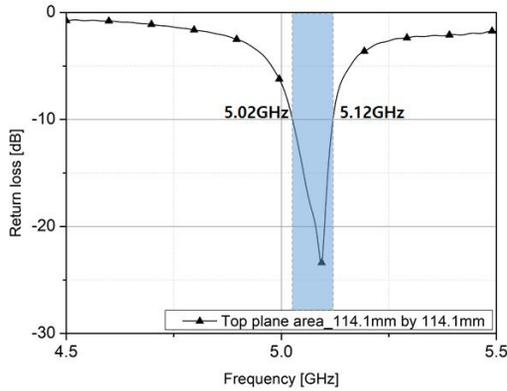
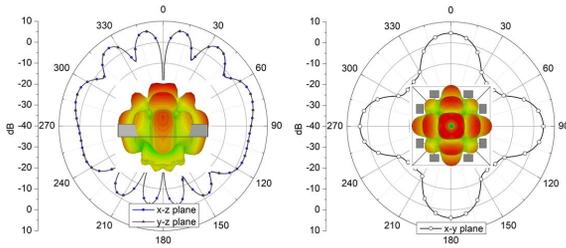


그림 14. 제안된 혼 반사기 적용 패치 배열안테나
Fig. 14. Proposed patch array antenna with horn reflector.



(a)



(b)

그림 15. 제안된 안테나의 반사손실(a) 및 방사패턴(b)
Fig. 15. Return loss(a) and radiation pattern(b) of the proposed antenna.

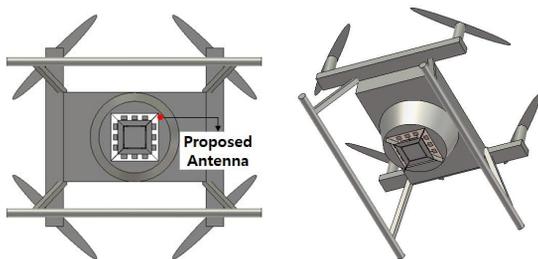


그림 16. 제안된 안테나의 UAV 장착 예상도
Fig. 16. Expected antenna mounted on UAV.

그림 15를 통해 안테나의 10 dB 반사손실 대역폭은 5.02~5.12 GHz(100 MHz)로 WRC-12의 대역폭(5.03~5.091 GHz)을 포함하고 방사패턴 상의 x-z 및 y-z 평면상에서 4.5 dBi 빔폭은 대략 146.8°로 목표 값인 140° 이상을 충족함을 알 수 있다. 뿐만 아니라, 제안된 안테나는 평면 안테나와 혼 반사기가 결합된 구조로 특히 높이가 낮아 그림 16과 같이 UAV에 장착될 경우 UAV의 비행 안정성에 기여할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 WRC-12에서 할당된 5.030~5.091 GHz 대역을 사용하여 UAV에 적용할 수 있는 3차원 구조의 안테나를 모델링 및 시뮬레이션 한 것으로, 제안한 안테나는 인쇄회로기판의 네 방면에 패치 배열 안테나들을 각각 배치하고 혼 반사

기를 패치 뒤에 적용하여 설계하였다. 혼 반사기 장착으로 인해 수직으로 형성되던 방사 패턴이 사선으로 형성되었고 이를 통해 넓은 빔 폭을 확보하게 되었다. 시뮬레이션 결과, 최종 설계된 안테나의 10 dB 반사손실 대역폭은 5.02 ~ 5.12 GHz(100 MHz)이고 4.5 dBi 빔 폭은 146.8°이다. 따라서 제안된 안테나는 반구형에 가까운 넓은 빔 폭과 2차원 안테나와 비교했을 때 상대적으로 높은 이득을 가지므로 지상 제어 장치와 원활한 통신이 가능할 것으로 예상된다. 뿐만 아니라, 구조적으로 단순하고 특히 높이가 낮아 UAV에 장착 시 비행 안정성에 기여할 수 있을 것으로 판단한다.

References

- [1] S. C. Yeo, S. W. Hong, H. G. Choi, and C. B. Yoon, "Data-link antenna design for drone control," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 13, No. 6, pp.1169-1176, Dec. 2018.
- [2] S. H. Son, J. H. Gang, and G. J. Park, "Overview and issues of drone wireless communications," *Information and communications magazine*, Vol. 33, No. 2, pp. 93-99, Feb. 2016.
- [3] T. Zhao, H. Wang, and Q. Ma, "The coverage method of unmanned aerial vehicle mounted base station sensor network based on relative distance," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 16, No. 5, May, 2020.
- [4] Akram Al-Hourani, Sithamparanathan Kandeepan, and Simon Lardner, "Optimal LAP altitude for maximum coverage," *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 3, No. 6, Dec. 2014.
- [5] L. Sun, B. Sun, J. Yuan, W. Tang, and H. Wu, "Low-profile, quasi-omnidirectional substrate integrated waveguide multihorn antenna," *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, Vol. 15, pp. 818-821, Sep. 2015.
- [6] L. Sun, B. H. Sun, Q. Sun, and W. Huang, "Miniaturized annular ring slot antenna for small/mini UAV applications," *Progress in Electromagnetics Research C*, Vol. 54, pp. 1-7, 2014.
- [7] X. Yang, Y. Qi, B. Yuan, Y. Cao, and G. Wang, "A miniaturized high-gain flexible antenna for UAV applications," *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2021, Jul. 2021.
- [8] Md Shahidul Alam and Amin Abbosh, "Planar pattern reconfigurable antenna with eight switchable beams for WiMax and WLAN applications," *IET Microwave, Antennas & Propagation*, Vol. 10, No. 10, pp. 1030-1035, Jul. 2016.
- [9] W. C. Zheng, L. Zhang, Q. X. Li, and Y. Leng, "Dual-band

- dual-polarized compact bowtie antenna array for anti-interference MIMO WLAN,” *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 62, No. 1, pp. 237-246, Jan. 2014.
- [10] C. U. Lee, G. Noh, B. K. Ahn, J. W. Yu, and H. L. Lee, “Tilted-beam switched array antenna for UAV mounted radar applications with 360° coverage,” *Electronics, MDPI*, Vol. 8, No. 11, Oct. 2019.
- [11] K. B. Park, J. G. Joung, S. J. Lim, and H. L. Lee, “A compact crossed inverted-V antenna with a common reflector for polarization diversity in the IOT,” *Electronics, MDPI*, Vol. 8, No. 6, Jun. 2019.
- [12] D. G. Seo, and W. S. Lee, “A multiply parasitic-coupled, three-dimensional antenna array with wide elevation angle for seamless UAV communications,” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Vol. 35, No. 4, pp. 461-465, Apr. 2020.
- [13] Y. J. Ye, and W. S. Lee, “Wideband printed half bow-tie antenna array based on a quad-mode reconfigurable feeding network for UAV communications,” *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2, pp. 238-248, Feb. 2021.
- [14] S. Ononchimeg, G. Otgonbaatar, J. H. Bang, and B. C. Ahn, “A new dual-polarized horn antenna excited by a gap-fed square patch,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 21, pp. 129-137, Feb. 2011.
- [15] W. Sethi, V. Hamza, and M. Alkanhal, “Millimeter wave antenna with mounted horn integrated on FR4 for 60 GHz Gbps communication systems,” *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol. 2013, Oct. 2013.
- [16] Antti E. I. Lamminen, Jussi Saily, and Antti R. Vimpari, “60-GHz patch antennas and arrays on LTCC with embedded-cavity substrates,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 9, Sep. 2008.
- [17] F. D. L. Peters, D. Hammou, S. O. Tatu, and T. A. Denidni, “Modified millimeter-wave Wilkinson power divider for antenna feeding networks,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 17, pp. 11-18, Aug. 2010.



김 성 훈 (Seong-Hun Kim)

2004년 8월 : 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 8월 : 고려대학교 전파통신공학과 (공학석사)
2020년 9월 - 현재 : 금오공과대학교 전자공학과 박사과정
※ 관심분야 : 안테나 설계, 전자파 신란 등



고 지 환 (Ji-Hwan Ko)

1982년 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
1985년 - 2000년 : 한국전자통신연구원 연구원
2000년 - 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
※ 관심분야 : 안테나 설계, 초고주파 도파관 및 수동부품 설계, 전자파 신란, 위성통신 등