

허니콤 코어에 적용된 비발디 안테나의 방사 특성 분석

장우혁* · 노정언* · 김천곤*[†]

Radiation Characteristic Analysis of Vivaldi Antenna with Honeycomb Core

Woo-Hyeok Jang*, Jung-Eun Noh*, Chun-Gon Kim*[†]

ABSTRACT: Numerous studies have explored structural antennas for integrating advanced wireless systems into aircraft without altering their external form. However, much of the research on structural antennas has focused on patch antennas, which are characterized by limitations such as narrow frequency bands and low directivity. In contrast, the Vivaldi antenna, widely utilized in wireless applications, offers the advantages of a wide frequency band and high directivity. Nevertheless, its application to aircraft has been challenging due to radiation direction constraints. In this study, we endeavor to address this issue by proposing the application of the antenna patch onto the honeycomb wall, thus enabling the use of the Vivaldi antenna on aircraft. The impact of the honeycomb structure on antenna radiation performance was analyzed, and the potential of the honeycomb Vivaldi antenna was validated through simulation.

초 록: 무선 기술의 발전으로 많은 시스템이 개발되었으며, 항공기에 이러한 시스템을 효과적으로 적용하기 위해 다양한 형태의 구조 안테나가 연구되어 왔다. 현재까지 대다수의 구조 안테나 연구는 패치 안테나를 중심으로 이루어졌으나, 패치 안테나는 좁은 주파수 대역과 낮은 지향성의 단점을 가지고 있다. 반면, 최근 무선 분야에서 널리 사용되는 비발디 안테나는 넓은 주파수 대역과 우수한 지향성을 갖고 있지만, 방사 방향의 제약으로 인해 항공기 구조에 효과적으로 적용하는 데 어려움이 있었다. 본 연구에서는 비발디 안테나를 항공기 구조에 적용하기 위해 허니콤의 구조에 비발디 안테나를 적용하여 방사 방향의 문제를 해결하고자 하였고, 시뮬레이션을 통해 허니콤 구조가 안테나에 주는 영향을 분석하여 허니콤 비발디 안테나의 가능성을 검증하였다.

Key Words: 구조 안테나(Structural antenna), 기능성 구조물(Functional structure), 복합재료(Composite materials), 허니콤 비발디 안테나(Honeycomb Vivaldi antenna)

1. 서 론

정보 통신 기술과 무선 기술의 발전함에 따라 이를 활용한 많은 시스템이 개발되었으며, 이러한 시스템을 항공기 등과 같은 운송수단에 적용하기 위한 안테나가 개발 및 적용되었다. 안테나는 효율적인 방사를 위해 운송수단의 표

면에 다양한 형태의 레이돔과 함께 돌출된 형태로 적용되었으나, 이러한 돌출된 형태의 안테나는 공기저항 증가로 인한 연료 효율 감소 등 항공기 성능 저하를 야기한다[1]. 또한 안테나의 크기는 활용되는 전자파의 파장에 따라 결정되며, 낮은 주파수 안테나는 크기가 커서 항공기에 적용하기 어려운 문제가 있다[2]. 이러한 문제를 해결하기 위해

구조 안테나를 개발하여 구조의 일부를 대체하는 연구가 진행되었다.

구조 안테나는 1990년대 미국의 Wright Patterson Air Force에서 처음으로 연구 및 공개되었다[3-5]. 본 문헌에서는 항공기 외부로 돌출된 안테나를 제거하고 안테나의 역할과 구조의 역할을 동시에 수행할 수 있는 CLAS(Conformal Load-bearing Antenna Structure)에 처음으로 제안하였다. 이후, 다양한 국내·외 연구팀들이 안테나의 전파 방사 성능 및 구조적 성능을 향상하기 위해 다양한 구조 안테나 연구를 수행하였다[5-10]. 그러나, 많은 연구의 수에 비해 활용된 안테나의 종류는 패치 안테나로 한정되어 있었다. 패치 안테나는 얇은 두께와 가벼운 무게, 쉬운 제작 방법 등의 이유로 많이 활용되었지만, 좁은 주파수 대역과 낮은 지향성으로 인해 적용 분야에 한계가 존재했다.

비발디 안테나는 1979년 Gibson에 의해 처음으로 소개된 엔드 파이어 안테나이다[11]. 무선 통신 기술이 많이 활용되면서, 높은 지향성과 넓은 주파수 대역의 특징을 가지는 안테나가 필요하게 되었다. 지향성 안테나는 무선 시스템의 용량을 높이고, 동일 채널 간섭과 다중 경로 효과를 줄이기 위해 많이 활용된다. 광대역 안테나는 레이더나 인공 위성 통신, 무선 센싱 시스템 등에 많이 활용되며, 최근에는 다중 안테나를 대체하기 위해 통신용으로도 많이 활용된다[12]. 비발디 안테나는 광대역 특성과 지향성 안테나의 특징을 가지고 있어 다양한 무선 시스템 분야에서 연구되고 있으나, 이러한 장점에도 불구하고 엔드 파이어 안테나라는 이유로, 비발디 안테나를 구조 안테나 적용하는 연구가 많이 부족하다.

본 연구에서는 비발디 안테나를 허니콤 코어 구조에 적용한 허니콤 비발디 안테나를 제안하고, 이 안테나의 방사 특성을 분석하여 항공기 적용 가능성을 검토해 보고자 한다. 기존 연구에서 나타난 패치 안테나의 한계를 비발디 안테나를 활용하여 극복하고, 허니콤 코어 구조의 벽면에 비발디 안테나를 적용하여 안테나의 방사 방향을 효과적으로 조절하고자 한다. 따라서 본 연구에서는 제안된 허니콤 비발디 안테나의 방사 특성을 시뮬레이션으로 확인하여 항공기 적용 가능 여부를 확인하고자 한다.

2. 재료의 특성 측정 및 안테나 설계

2.1 재료의 특성 측정

안테나 설계 및 방사 특성 해석을 위해 glass/epoxy와 adhesive film의 유전율을 측정하였다. 유전율 측정을 위해 Fig. 1의 절차에 따라 glass/epoxy, adhesive film 시편을 제작했다. Glass/epoxy 시편은 프리프레그(GEP118, Hyundai Fiber)를 Fig. 1(a)의 오토클레이브 경화를 통해 사각형 형태로 제작되었다. 이때, 프리프레그 한 장만을 경화하여 허니콤 구조 프리월(free wall)과 유사한 두께와 유전율을 재현

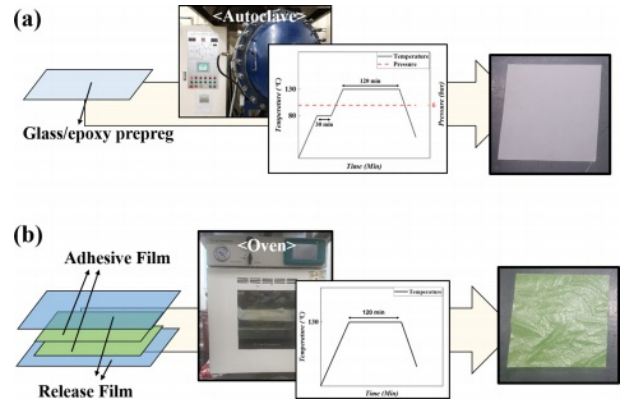


Fig. 1. Fabrication process for permittivity measurement specimen; (a) Glass/epoxy, (b) Adhesive film

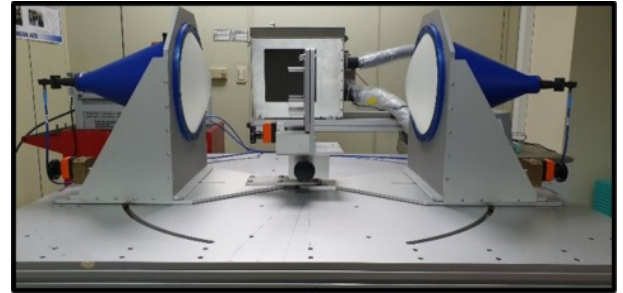


Fig. 2. Free space measurement

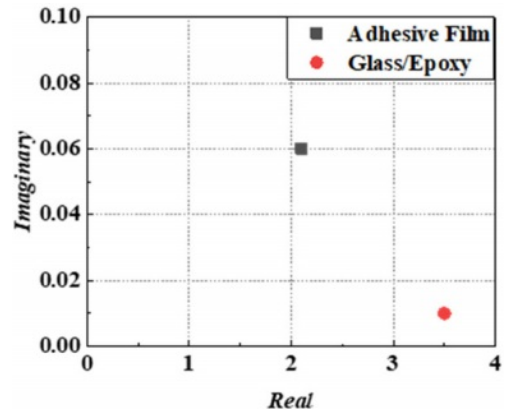


Fig. 3. Results of permittivity measurement of glass/epoxy and adhesive film

하였다. 경화된 adhesive film(AF126, 3M)의 유전율을 측정하기 위해 Fig. 1(b)의 오븐 경화 과정을 통해 사각 시편을 제작하였다. 이렇게 제작된 시편들의 두께를 마이크로미터로 측정하였고, 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해 시편을 아홉 개의 구역으로 나눈 뒤, 총 아홉 번의 측정을 진행하여 평균값을 계산했다.

제작된 시편과 두께 데이터를 활용하여 시편의 유전율을 측정하였다. 시편의 유전율 측정에는 Fig. 2의 자유공간 측정 장비를 사용하였다. 이 장비는 두 개의 안테나 사이에

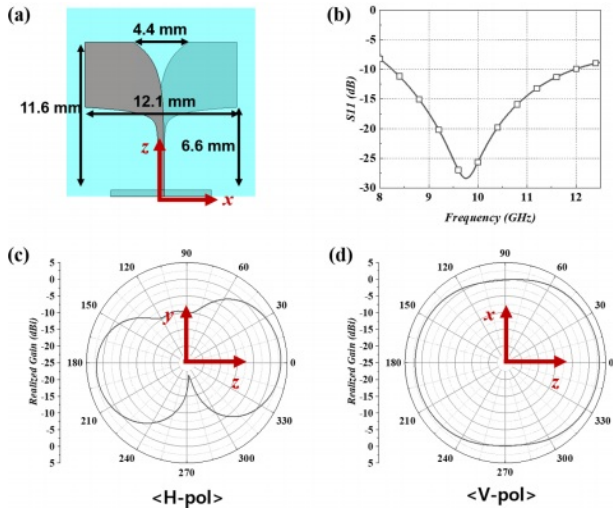


Fig. 4. (a) Design of Vivaldi antenna (b) S11 simulation result (c) H-pol antenna gain simulation result, (d) V-pol antenna gain simulation result

시편을 배치한 후, 각 안테나에서 방사된 전파가 시편에서 반사, 투과, 흡수된 정도와 위상 변화를 측정하여 시편의 유전율을 계산한다. 이러한 방법을 통해 측정된 glass/epoxy와 adhesive film의 유전율은 Fig. 3와 같이 목표 주파수 대역인 X-band의 중심 주파수인 10 GHz에서 각각 $3.51 - j0.01$, $2.1 - j0.06$ 이다. Adhesive film의 경우, 손실을 나타내는 유전율의 허수부가 높게 나타났기 때문에 adhesive film이 적용되지 않는 허니콤의 프리월을 기준으로 안테나를 설계 및 연구를 진행하였다.

2.2 비발디 안테나 설계

측정된 유전율과 두께를 활용하여, 허니콤 프리월을 기준으로 비발디 안테나를 설계하였다. 안테나 설계에는 CST 소프트웨어의 Optimizer Tool을 활용하였다. CST 소프트웨어에 허니콤 프리월과 동일한 두께, 유전율을 갖는 substrate를 모델링 한 뒤, 10 GHz에서의 이득이 가장 큰 안테나 패치 형상을 최적화하여 도출하였다. 설계된 비발디 안테나의 형상과 성능은 Fig. 4와 같다. Fig. 4(b)의 S11 해석 결과에서 8.26 GHz~11.96 GHz에서 -10 dB 이하의 값이 나왔기 때문에 X-band 영역 대부분에서 안정적으로 활용할 수 있음을 확인할 수 있으며, Fig. 4(c)의 방사 패턴을 통해 z 축 방향으로 전파가 방사됨을 확인할 수 있다. 이렇게 설계된 안테나를 허니콤 모델의 프리월에 적용하여, 허니콤 구조물이 안테나 방사 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 시뮬레이션 모델 및 세팅

3.1 허니콤 구조 모델링

해석의 정확도 향상을 위해 허니콤의 노드(Node)에 대한

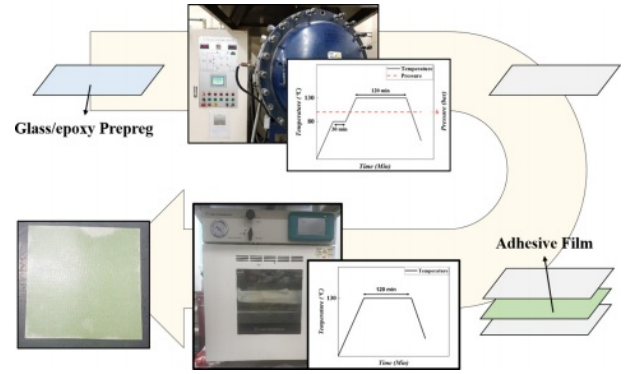


Fig. 5. Fabrication process for permittivity measurement specimen of node part

분석을 수행하였다. 허니콤의 프리월은 경화된 프리프레그한 장으로 이루어져 있어 모델링이 비교적 간편하다. 그러나 노드 부분은 두 장의 경화된 프리프레그가 adhesive film으로 접착된 구조이기 때문에, 각 구성 요소의 두께에 대한 분석이 필요하다. 이를 위해 실제 허니콤 제작 과정을 고려하여 허니콤 노드 부분에 해당하는 시편을 제작하고, 시편의 두께와 유전율을 측정한 후, 이와 동일한 두께와 유전율을 갖는 해석 모델을 생성했다. 시편은 Fig. 5와 같이 오토 클레이브를 사용하여 glass/epoxy 스킨을 제작한 후, 오븐을 통해 두 개의 경화된 glass/epoxy를 adhesive film으로 접착하여 시편을 제작하였다. 제작된 시편의 두께와 유전율을

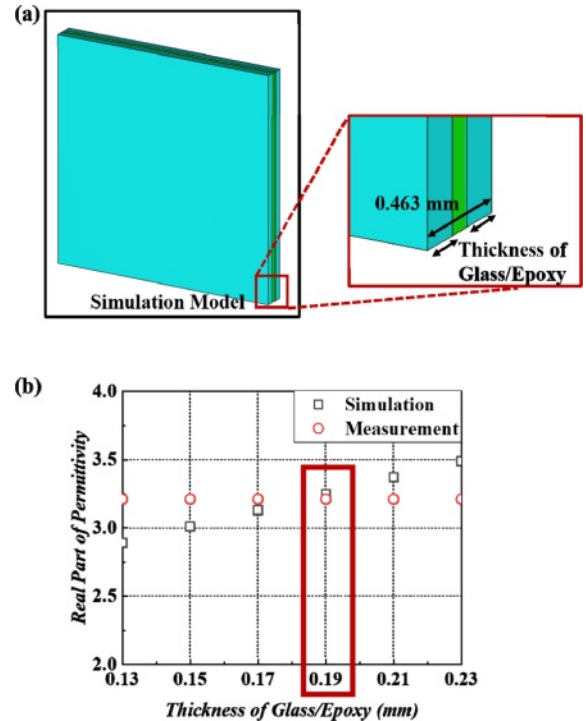


Fig. 6. Simulation model for checking node part permittivity, (b) Simulation and measurement result of node part permittivity

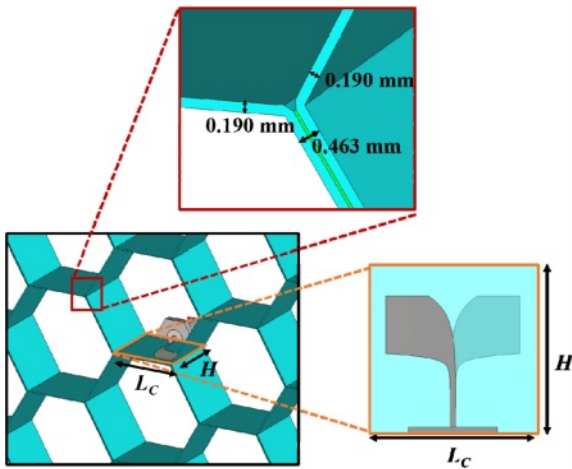


Fig. 7. Simulation model of honeycomb Vivaldi antenna and parameter

이전과 동일한 방법으로 측정하였다.

측정된 정보를 통해 허니콤 코어의 노드 부분을 모델링 하였다. 제작된 시편의 두께가 0.463 mm로 측정되어, Fig. 6(a)와 같이 해석 모델의 총 두께를 0.463 mm로 설정하였다. 이후, glass/epoxy의 두께에 따른 모델의 유전율을 CST 소프트웨어를 통해 해석하여, 측정된 유전율 값과 유사한 값이 나오는 두께를 찾아냈다. Glass/epoxy 두께에 따른 유전율 해석 결과는 Fig. 6(b)의 그래프와 같다. 해석 결과를 통해 구한 유전율과 측정된 유전율 데이터를 비교하여, glass/epoxy의 두께는 기존 경화된 glass/epoxy의 두께와 동일한 0.190 mm로 설정하고 adhesive film의 두께를 0.083 mm로 설정하여 허니콤의 노드 부분을 해석 모델에 표현하였다.

3.2 허니콤 비발디 안테나 모델링 및 변수 설정

3.1절에서 파악한 노드 부분의 glass/epoxy 두께와 adhesive film의 두께를 이용하여 허니콤 비발디 안테나를 Fig. 7과 같이 모델링하였다. 허니콤 프리월의 두께는 경화된 glass/epoxy 프리프레그 한 장과 동일하게 0.190 mm로 설정하였으며, 허니콤 모델의 중앙에 있는 프리월에 설계된 안테나를 적용하여 허니콤 비발디 안테나를 모델링하였다. 이로써 생성된 허니콤 비발디 안테나 모델을 활용하여 허니콤의 두께(H)와 cell side length(L_c)가 안테나 방사 특성에 미치는 영향을 확인하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 Return Loss (S11)

허니콤 코어의 형상에 따른 안테나의 반사 손실을 시뮬레이션으로 확인하였다. 반사 손실은 입력되는 신호와 반사되어 나오는 신호의 세기의 비율로 측정되며, 반사 손실이 -10 dB 이하인 경우 안테나가 설계되었다고 판단할 수

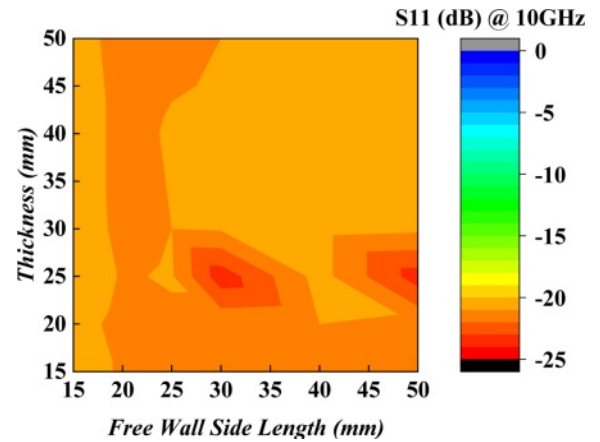


Fig. 8. S11 simulation result

있다. Fig. 8은 허니콤 구조물의 형상에 따른 반사 손실을 시뮬레이션으로 확인한 결과를 정리한 것이다. 허니콤 구조의 형상에 따라 약간의 차이가 존재하나, 안테나의 반사 손실에는 큰 영향이 없음을 확인할 수 있다. 이를 통해 허니콤 형상은 안테나의 설계에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.2 안테나 이득

허니콤 형상에 따른 안테나의 이득 변화를 시뮬레이션

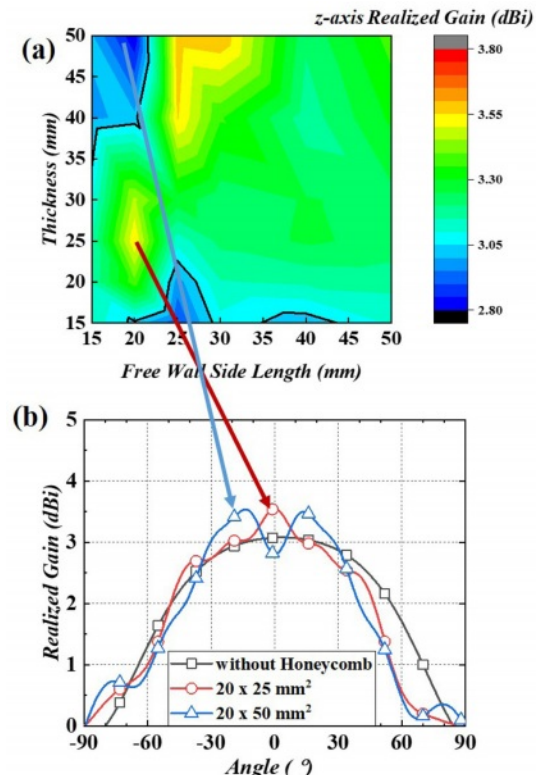


Fig. 9. Antenna gain simulation result of honeycomb Vivaldi antenna, (a) z-axis gain, (b) V-pol at -90° ~ 90°

으로 확인하였다. 안테나의 이득은 안테나의 방사 패턴과 효율을 동시에 나타내는 지표이다. Fig. 9(a)는 허니콤 형상 변화에 따른, 허니콤 비발디 안테나의 두께 방향 이득을 정리한 그래프이다. 반사 손실과는 달리 허니콤 구조의 형상이 안테나 이득에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(b)는 허니콤 두께 방향 이득이 가장 큰 경우와 가장 낮은 경우의 각도에 따른 안테나 이득을 정리한 그래프이다. 이를 통해 허니콤 구조가 안테나의 지향성에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 허니콤 구조를 형성하는 재료가 유전체이기 때문에, 허니콤 구조에서 반사, 투과, 회절 등의 현상이 발생하고, 이러한 현상들이 안테나의 방사 특성에 영향을 미치게 된다. 따라서, 허니콤 비발디 안테나를 활용하기 위해서는 적절한 크기의 허니콤 구조를 선택해야 하며, 또한 허니콤 구조물에 의한 보강 간섭으로 안테나의 지향성이 향상될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 항공기 구조에 비발디 안테나를 적용하기 위해 허니콤 비발디 안테나를 제안하였으며, 허니콤 구조의 형상이 해당 안테나의 방사 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 허니콤 구조가 크기가 안테나의 반사 손실에는 거의 영향을 주지 않았지만, 방사 특성에는 영향을 주는 것을 확인하였다. 허니콤 구조물에 의한 전자파의 투과, 반사, 회절 등의 현상으로 인해 안테나의 이득이 형상에 따라 변화함을 확인하였다. 또한, 반사나 회절된 전파들이 보강 간섭을 일으켜 허니콤 구조가 없는 경우보다 안테나 이득이 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 허니콤 구조에 비발디 안테나를 적용할 경우, 전파의 방향을 구조물에 수직인 방향으로 조절할 수 있으며, 허니콤 구조로 인해 안테나의 이득을 증가시킬 수 있어, 허니콤 비발디 안테나를 실제 항공기의 구조에 적용할 수 있는 가능성이 존재함을 확인하였다.

REFERENCES

- Kim, M.S., and Seo, J.W., "Development Trends in Integrated Structure Technology with Built-in Antenna," *Defense Science & Technology Plus*, Vol. 242, 2018, pp. 77-82.
- Callus, P.J., "Conformal Load-Bearing Antenna Structure for Australian Defence Force Aircraft," *Australian Government Defence Science and Technology Organization*, DSTO-TR-1963, 2007, pp. 1-50.
- Lockyer, A.J., Kudva, J.N., Kane, D., Hill, B.P., Martin, C.A., Goetz, A.C., and Tuss, J., "Qualitative Assessment of Smart Skins and Avionic/Structures Integration," *In SPIE Smart Structures and Materials*, Vol. 2189, 1994, pp. 172-183.
- Lockyer, A.J., Alt, K.H., Kudva, J.N., Kinslow, R.W., and Goetz, A.C., "Conformal Load-Bearing Antenna Structures (CLAS): Initiative for Multiple Military and Commercial Applications," *In SPIE Smart Structures and Materials*, Vol. 3046, 1999, pp. 182-196.
- Lockyer, A.J., Alt, K.H., Coughlin, D.P., Durham, M.D., Kudva, J.N., Goetz, A.C., and Tuss, J., "Design and Development of a Conformal Load-Bearing Smart Skin Antenna: Overview of the AFRL Smart Skin Structures Technology Demonstration (S3TD)," *In Smart Structures and Materials 1999: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, Vol. 3674, 1999, pp. 410-424.
- Kim, D.H., Hwang, W., Park, H.C., and Park, W.S., "Bending Fatigue Characteristics of Surface-Antenna-Structure," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 17, No. 6, 2004, pp. 22-27.
- Kim, D.S., Hwang, W., Park, H.C., and Park, W.S., "Design of Multilayer Composite-Antenna-Structures Considering Adhesive," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 2, 2007, pp. 27-31.
- Lee, S., Cho, S., Lee, C., and Hwang, W., "Design and Impact Testing of Cylindrical Composite Antenna Structures," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 3, 2009, pp. 55-59.
- Kim, J.Y., Kim, D.S., Park, B.R., Kim, J.S., Kim, M.S., Park, C.Y., and Hwang, W.B., "Safety Evaluation of Radiating Element by Structural Test and Stress Analysis," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 26, No. 4, 2013, pp. 259-264.
- Jang, W.H., Kim, S., Noh, J.E., Choi, J.S., Cha, J.H., and Kim, C.G., "Carbon-Fiber-Stitched Substrate in Coaxial-Fed-Patch-Antenna for Removing Hole in Feeder," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 24, 2022, pp. 449-458.
- Gibson, P.J., "The Vivaldi Aerial," *Proceedings of the 9th European Microwave Conference*, Brighton, United Kingdom, Sep. 1979, pp. 101-105.
- Bhattacharjee, A., Bhawal, A., Karmakar, A., Saha, A., and Bhattacharya, D., "Vivaldi Antennas: a Historical Review and Current State of Art," *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 13, 2020, pp. 833-850.