

論文

원통형 복합재료 안테나의 설계 및 충격 실험에 관한 연구

이상민*, 조상현**, 이창우*, 황운봉**

Design and Impact Testing of Cylindrical Composite Antenna Structures

Sangmin Lee*, Sanghyun Cho**, Changwoo Lee*, and Woonbong Hwang**

ABSTRACT

Microstrip antennas are low profile, are conformable to planar and nonplanar surfaces, are simple and inexpensive to manufacture, mechanically robust when mounted on rigid surfaces and are compatible with MMIC(Monolithic microwave integrated circuit) designs; they have been used in diverse communication systems. The rectangular microstrip patch antenna is designed for a central frequency of 12.5 GHz, and the final product is a 4×1 array antenna with curvature radius of 200 mm. The microstrip antenna is embedded in a sandwich structure which consists of skin and core material. After impact, the performance of damaged antenna is estimated by measuring the return loss and radiation pattern. The antenna performance was not affected by this impact damage.

초 록

마이크로스트립 안테나는 가볍고 부피가 작을 뿐만 아니라 집적화가 가능하고, 표면 부착력이 탁월하여 많은 통신 시스템 안테나로 응용되고 있다. 안테나의 구조는 12.5GHz의 중심주파수를 갖는 사각 패치 마이크로 스트립 안테나로 설계하였고 곡률 방향으로 패치를 확장시켜 총 4개의 패치를 배열시켰다. 양쪽의 복합재료 사이에 허니컴을 삽입한 샌드위치 구조물이 되도록 설계한 다음 충격 실험을 실시하였다. 충격실험 후 안테나 성능변화를 측정된 결과 영향을 받지 않는다는 것을 확인하였다.

Key Words : 복합재료 안테나(composite antenna structure, CAS), 충격실험(impact behavior), 마이크로스트립 안테나(microstrip antenna), 원통형 복합재료 안테나(cylindrical CAS)

1. 서 론

최근 정보 통신 기술의 발전이 급속도로 이루어지면서 GPS, 위성항법시스템, 유비쿼터스, 무선 네트워크 등 언제 어디서나 사용할 수 있는 무선 통신 시스템의 범위가 급속도로 확산되어 가고 있다. 이때 통신 시스템의 성능과 기능이 제대로 발휘되기 위해서는 적합한 성능의 안테나가 기본적으로 필요하다. 또한 비행기나 자동차 등 장시간을 보내게 되는 운송 수단에서의 라디

오 수신이나 GPS, 위성 방송 등의 위성 수신용 안테나 등이 필요하게 된다. 하지만 기존의 안테나처럼 구조체의 표면에 돌출형으로 위치시키는 것은 많은 공간을 차지하고, 기계적으로 매우 취약하고 전기적으로는 접합손실과 경로손실이 심해 다양한 서비스를 제공하는 데는 한계가 있다. 최근에는 라디오 수신용 안테나의 경우 후방 유리창에 다이폴 안테나를 내장하여 이러한 단점을 극복하고 있으나 이는 위성 수신용 안테나로의 사용은 불가능하다. 이에 1996년부터 미국의 Wright Patterson Air Force

* 포항공과대학교 기계공학과

**+ 포항공과대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:whwang@postech.ac.kr)

** 현대자동차 연료전지 개발 1팀

에서는 항공기의 안테나 부착에 의한 돌출부의 결함을 근본적으로 제거하기 위하여 안테나 기능과 함께 강도, 강성 등의 구조적 특성을 갖는 CLAS(Conformal Load-Bearing Antenna Structure)에 관한 연구를 수행하고 있다[1-4]. CLAS는 안테나와 구조물을 결합한 것으로, 구조물에 삽입 가능한 Spiral 안테나 또는 마이크로스트립 안테나와 안테나에 필요한 공간을 제공하는 샌드위치 구조물이 사용된다[1-4].

마이크로스트립 안테나는 가격이 저렴하고, 가벼우며, 부착이 용이하다는 장점으로 인해 1950년대 이후 널리 사용되고 있는데, 나선(Spiral) 안테나 보다 제작이 간편하고 가벼우며 부피가 작을 뿐만 아니라 공진 안테나이기 때문에 현재의 이동 통신용 안테나로 적합한 안테나이다.

샌드위치 구조물은 높은 비강도 및 비강성, 압축 하중에 대한 높은 안정성을 가지고 있으므로 1940년대 처음 소개된 이후 사용이 점점 증가하고 있다. 샌드위치 구조물은 면재(face sheet)와 그것을 받쳐주는 심재(core)로 구성되어 있는데, 면재가 하중을 지지하므로 손상허용치(damage tolerance)가 증가하고, 심재가 에너지를 흡수하므로 충격에 대한 에너지 흡수성이 높아진다. 이러한 이점 때문에 샌드위치 구조물은 항공, 우주 산업은 물론 건설자재, 선박 등에 널리 사용되고 있다. 샌드위치 구조물의 면재로는 치수 안정성, 피로 특성, 비강도 및 비강성 등 우수한 기계적 성질을 가지고 있는 섬유강화 복합재료가 주로 사용되며, 심재로는 비강성이 우수한 가벼운 폼(foam)이나 허니컴(honeycomb)이 사용된다[5,6].

이러한 복합재료 샌드위치 구조물에 안테나의 기능을 추가한 CLAS를 항공기나 자동차 등의 표면에 이용을 하고자 하더라도 때때로는 필연적으로 구조에 결함이 발생하게 된다. 이에 따라 구조의 기계적인 특성이나 안테나의 특성이 변화될 것이다. 그러므로 본 논문에서는 이러한 CLAS의 개념을 바탕으로 복합재료 샌드위치 구조물에 위성 통신용 안테나 기능을 삽입한 복합 재료 안테나(Composite Antenna Structures, CAS)를 설계하여 결함을 가지는 안테나에 충격 에너지를 주었을 때 안테나의 성능의 변화를 알아보고자 한다.

2. 이론

2.1 마이크로 스트립 패치의 내부 필드

원통형 쾨포말 마이크로 스트립 안테나의 해석을 위하여 고려되는 구조는 Fig. 1과 같이 반경이 a 인 원통면에 유전율이 ϵ_r 인 높이 h 의 기판이 있고 그 위에 $2b$, $2(a+h)\theta_1$ 의 크기를 갖는 패치 안테나가 부착된 구조이다.

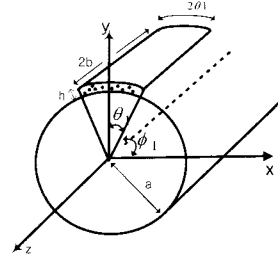


Fig. 1 Geometry of the cylindrical-rectangular microstrip patch antenna.

패치와 원통 접지면 사이의 공간을 위, 아래의 전계 벽과 그 주위에 자계 벽으로 막힌 cavity로서 고려될 수 있다. Cavity 모델의 해석은 유전체의 두께가 파장에 비해 매우 작을 경우 허용되며, 이 경우에 패치 내부에서 접지 면으로부터 나온 전계는 구부러질 틈이 없이 도체 패치로 들어가기 때문에 전계는 E_ρ 성분만 가지며 패치 내부 필드는 ρ 의 함수가 아니라고 볼 수 있다. Source free 영역에서 원통 좌표 계에 대한 E_ρ 성분에 관한 파동 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial E_\rho}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi^2} + \frac{\partial E_\rho}{\partial z^2} + k^2 E_\rho = 0$$

$$k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$$

Cavity 모델 근사화를 적용하면, 전계는 E_ρ 성분만 존재하고 필드는 ρ 의 함수가 아니기에 다음과 같이 간단해 진다.

$$\left[\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right] E_\rho = 0$$

이때 유전체의 두께가 원통 반경에비해서 충분히 작다면 $\rho a + h$ 로 놓아 더욱 간략화시킬 수 있으며 그 식에 변수분리 법을 적용하여 풀 후 패치를 둘러싼 옆면이 자계 벽인 경계조건을 적용하면 패치 내부의 전계 분포와 공진 주파수를 알 수 있다.[7]

$$E_\rho = E_0 \cos \left[\frac{m\pi}{2\theta_1} (\phi - \phi_1) \right] \cos \left(\frac{n\pi z}{2b} \right)$$

$$k^2 = k_{mm}^2 = \left(\frac{m\pi}{2(a+h)\theta_1} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2b} \right)^2$$

$$f_{mm} = \frac{C}{2\sqrt{\epsilon_r}} \left[\left(\frac{m}{2(a+h)\theta_1} \right)^2 + \left(\frac{n}{2b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

2.2 마이크로 스트립 패치 안테나의 방사 필드

접지면의 형태가 원통이기 때문에 이를 고려해야 한다. 원통 좌표계에서 Scalar Helmholtz 방정식은 변수분리 법, 상미분 적분 등의 과정을 거치면 원거리 방사패턴 식을 얻을 수 있다.[7]

$$E_{\theta} = \frac{E_0 h e^{-jkr}}{2\pi^2 r \sin\theta} \left[1 - (-1)^n e^{j2k_0 b \cos\theta} \right] \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\theta} j^{p+1} e^{-j\theta} I(\theta, m, -p)}{H_p^{(2)}(k_0 a \sin\theta)}$$

$$E_{\phi} = -j \frac{E_0 h}{2\pi^2 r a} e^{-jkr} I(b, n, -k_0 \cos\theta) \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\theta} j^{p+1} e^{-j\theta}}{H_p^{(2)}(k_0 a \cos\theta)} \left[1 - (-1)^m e^{-j2k_0 b} \right]$$

$$-j \frac{E_0 h}{2\pi^2 r a k_0 \sin^3\theta} \cos\theta \left[1 - (-1)^n e^{j2k_0 b \cos\theta} \right] \sum_{p=-\infty}^{\infty} \frac{p e^{j\theta} j^{p+1} e^{-j\theta} I(\theta, m, -p)}{H_p^{(2)}(k_0 a \sin\theta)}$$

$$I(b, n, u) = \int_{-2b}^b \cos\left(\frac{n\pi z}{2b}\right) e^{-juc} dz$$

$$I(\theta, m, -p) = \int_0^{2\theta} \cos\left(\frac{m\pi\phi}{2\theta}\right) e^{-j\theta} d\phi$$

3. 실험

3.1 4x1 Array Antenna 설계

본 논문에서 설계하고자 하는 안테나는 국내에서 상용서비스 중인 무궁화위성의 위성체 제원을 고려하여 설정된 성능요구조건을 기준으로 사용하였다. 사용 주파수는 12.5 GHz의 중심주파수로 12.25~12.75 GHz의 대역폭을 가진다. 안테나 디자인은 상용 소프트웨어인 Ensemble 5.1을 이용하여 진행하였다. 설계된 안테나는 Fig. 3과 같이 성능 요구 조건을 만족하도록 치수를 결정하여 4x1 안테나를 설계하였다. 이를 이용한 최종 구조물의 크기는 50mmx50mm이다.

3.2 안테나 제작

안테나 제작을 위해 (주) SK Chemical 사의 UGN200으로 단방향 유리섬유 에폭시 복합재료 프리프레그(prepreg)를 이용하였다. 복합재료의 적층은 [0°/90°]₂, 총 네 장의 프리프레그를 대칭이 되도록 적층하여, 경화후의 두께는 0.5mm가 되도록 하였다. 이때의 경화 주기는 Fig. 3에 나타내었다. 곡물의 균형을 이용하여 200mm의 곡률반경을 갖는 면재를 제작하였다. 안테나의 전체 구조는 Fig. 4와 같이 복합재료 면재 위에 기판, 기판 위에 허니컴, 위에 다시 복합재료 면재를 사용하여 샌드위치 구조물이 되도록 하였고, 허니컴은 Showa사의 OX-Core 허니컴을 사용하였다.

3.3 안테나 성능 측정 및 충격실험

제작된 안테나의 사용주파수를 확인하기 포항공과대학교 안테나 연구실의 HP-8510B Network Analyzer (NA)를 이용하여 반사계수를 측정하였다. 방사패턴은 포항공과대학교 전자과의 Compact range를 사용하여 측정하였다. 저속 충격 실험은 자유

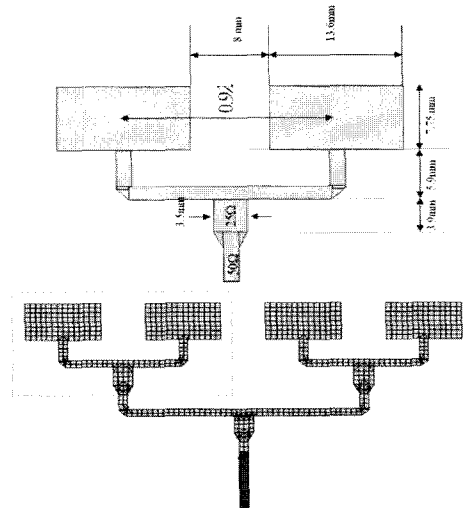


Fig. 2 Configuration of 4x1 antenna element.

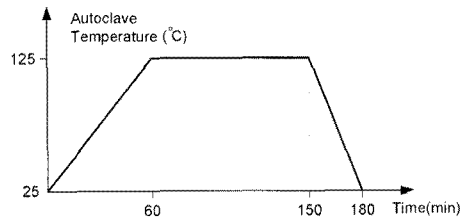


Fig. 3 Curing temperature cycle.

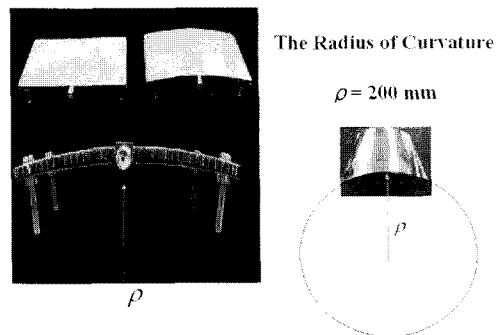
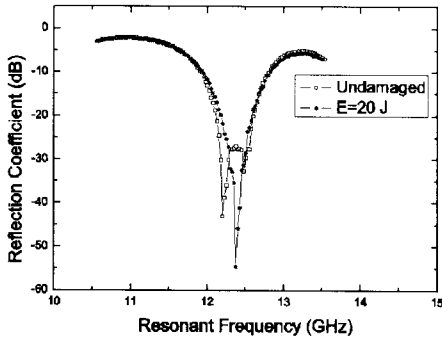


Fig. 4 Fabricated Composite Antenna structures.

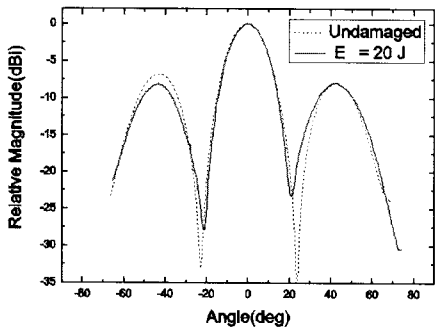
낙하 식 충격 시험기(Drop weight impact test)인 General Research사의 Dynatup 8250을 이용하여 수행하였다. 충격체의 무게는 5.32 kg을 사용하였다. 충격체의 에너지 준위는 충격체의 높이로 조절하여 관통이 일어나기 직전인 20J의 에너지로 충격이 가해지도록 하였다.

4. 결과

NA를 이용하여 설계된 안테나의 반사계수를 측정한 결과 Fig. 5(a)와 같이 공진주파수가 12.5GHz가 아닌 12.7GHz에서 공진하였다. 하지만 12.5GHz에서도 반사계수가 -20DB 이하를 보여줌으로써 초기의 목표에 부합하는 측정 결과를 얻었다. Compact range에서 방사 패턴을 측정한 결과 Fig. 5(b)와 같이 나타났다. 각 패치에서는 동일한 빔이 수직된 방향으로 방사되고 이것이 합쳐져서 전체적인 방사 패턴을 이루게 된다. 총 네 개의 패치를 이용했기 때문에 중앙에서 주빔이 형성되고 그 옆으로 주빔보다 작고 양쪽에 같은 크기의 부엽이 생기게 된다.



(a) Reflect Coefficient at the impact energy of 20J



(b) Radiation Pattern at the impact energy of 20J

Fig. 5 Antenna performance after damage.

충격 실험을 실시한 결과 20J의 충격 시에는 구조물이 충격을 직접 준 윗면뿐만 아니라 아랫면까지 손상을 입을 정도의 큰 충격이 발생하였으나 Fig. 6에서와 같이 공진 주파수와 대역폭 방사패턴에는 큰 차이가 없었다. 이는 안테나의 구조물에 충격을 가할 때 직경 12.7 mm의 반원 형상의 충격체가 안테나의 중앙을 때리게 되는데 구조물의 중앙은 방사 소자와 소자 사이의 공간을 때리게 된다. 그러므로 이 정도의 국부적인 손상으로는 안테나 성능에 큰 영향을 끼치지 못함을 알 수 있었고, 안테나 구조물이 국부적인 손상에서도 제 성능을 발휘할 수 있음을 확인할 수 있었다.

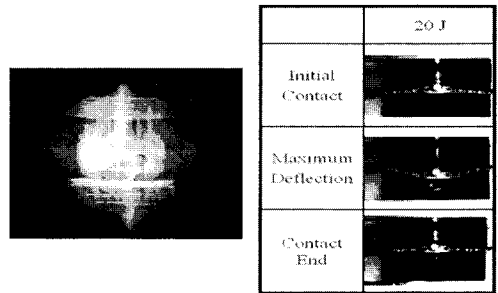


Fig. 6 Impact Test Picture by various impact energy.

4. 결론

곡률반경이 200mm인 안테나를 제작한 후 충격에너지를 20J로 하여 충격테스트를 실시한 후 충격 손상후의 안테나 성능변화를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 곡률을 갖는 복합 구조체 안테나를 설계 및 제작 측정한 결과 설계한 측정치와 같은 성능을 갖는 것을 확인하였다.
- 2) 안테나 구조물에 관통이 가까운 충격을 주었음에도 안테나 성능에는 큰 변화가 없음을 보임으로서 안테나 구조물의 신뢰성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고문헌

- 1) Tuss, J., Lockyer, A., Alt K, Uidrich, F., Kinslow, R., Kudva, J. and Goetz, A., "Conformal Loadbearing Antenna Structure," *AIAA Paper* 1996, pp. 836-843.
- 2) Hopkins, M. A., Tuss, J. A., Lockyer A. J., Alt K., Kinslow, R., and Kudva, J. N., "Smart Skin Conformal Load-bearing Antenna and Smart Structures Developments," *AIAA Paper* 97-1163, 1997, 521-530.
- 3) Lockyer, A. J., Alt, K. H., Kudva, J. N., Kinslow, R. W., and Goetz, A., "Conformal Load-bearing Antenna Structure (CLAS): Initiative for multiple military and commercial applications," *SPIE Smart Structures and Materials*, Vol. 3046, March 1997, pp. 182-196.
- 4) 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)," *SPIE Structures and Materials*, Vol. 3674, March 1999, pp. 410-424.
- 5) Peters, S. T., *Handbook of Composite Materials*, 2nd ed., Chapman & Hall, 2nd ed, 1998.
- 6) ASM INTERNATIONAL Handbook Committee, *Engineering Materials Handbook*, Vol. 1: Composites, ASM INTERNATIONAL, 1987.
- 7) Luk, K. M., Lee, K. F., "Analysis of the cylindrical-rectangular patch antenna," *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 37, No. 2, February 1989, pp. 143-147.