

## 論文

## 위상배열 응용을 위한 스마트 스킨 안테나 설계 및 제작

손성호\*, 황운봉\*+

## Design and Fabrication of Smart Skin Antenna for Phased Array Applications

Seong Ho Son\*, Woonbong Hwang\*+

## ABSTRACT

This paper describes the basic design and fabrication of smart skin antenna for phased array applications. The smart skin phased array antenna, of which radiation pattern can be electrically steerable without mechanical rotation, has to meet the both mechanical and electrical performance. The smart skin antenna is a honeycomb sandwich structure to enhance the mechanical performance such as strength, weight and so on. The example of smart skin antenna integrated with radome is designed with the resonant frequency of 5 GHz, circular polarization, 2 by 2 subarray, and a coaxial probe-fed excitation. In addition, the performance of raw microstrip patch antenna uncovered radome is investigate. The fabricated smart skin antenna shows a reasonable performance with gain of 12.2 dBi and frequency bandwidth of 6.4 %.

## 초 록

본 논문에서는 위상배열로 응용할 수 있는 스마트 스킨 안테나에 대한 기본 설계와 제작에 대해 소개하였다. 스마트 스킨 위상배열 안테나는 기계적 회전 없이 전기적으로 안테나 방사패턴을 조향 제어할 수 있는 안테나로서, 강도 및 중량 등의 기계적 특성이 우수한 허니콤 샌드위치 구조를 이용하여 전기적, 기계적 특성을 모두 만족하도록 설계되어야 한다. 본 논문에서 제시한 스마트 스킨 안테나는 공진 주파수 5 GHz 원형편파의 2×2 부배열이며, 동축 케이블에 의한 프루브 급전방식으로 설계하였다. 그리고, 전자기 수치해석을 통하여 레이돔이 있는 경우와 없는 경우에 대해 비교 분석하였다. 이와 같이 설계된 안테나를 제작하여 안테나 성능시험을 하였으며, 그 결과 이득은 12.2 dBi, 주파수 대역폭은 6.4 %의 양호한 성능을 확인하였다.

**Key Words :** 위상배열안테나(Phased Array Antenna), 스마트 스킨(Smart Skin), 허니콤 샌드위치(Honeycomb Sandwich)

## 1. 서 론

무선 통신 기술의 발달과 더불어 다양한 통신 서비스에 대한 요구가 날로 증대됨에 따라 각 통신 시스템에 적합한 안테나에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 지금까지 연구되어온 안테나는 구조체 표면에 별도로 부착되는 형태로써 구조적으로 안정하지 못한 단점이 있다. 운송수단에 사용되는 구조물은 구조적으로 안정해야 하며 경량화가 필수적이기 때문에 단위 중량 당 강도

가 월등히 우수한 복합재료가 각광을 받고 있는 추세이다.[1] 이에 허니콤을 이용한 샌드위치 구조물을 안테나에 적용하여 구조적인 기능뿐만 아니라 안테나의 기능도 동시에 만족시키는 기능성 적응구조에 대한 연구가 최근 시작되고 있다.[2-5]

이러한 샌드위치 구조물을 이용한 스마트 스킨 안테나의 초고주파 방사소자로서 마이크로스트립 패치 안테나(microstrip patch antenna)가 주로 이용된다.[4-5] 마이크로스트립 패치 안테나는 적층하여 제작하기 용이하고 가격이 저렴한 장점이 있다. 하지만,

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

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

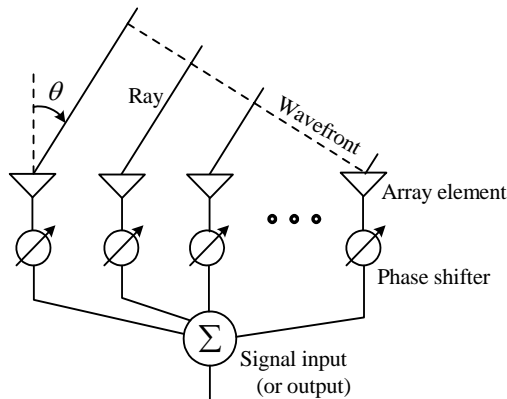


Fig. 1 Typical phased array antenna.

구조상 높은 전력신호를 다루지 못하므로 고이득이 필요할 경우 여러 개의 패치 안테나를 배열하여 이용하기도 한다.[6-7] 특히, Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 배열 안테나의 각 방사소자에 인가되는 전류의 위상을 변화시켜 각 방사소자에 도달 전파의 위상을 일치시킴으로써 안테나 빔을 전기적으로 조향할 수 있다. 이러한 안테나를 위상배열 안테나라고 한다. 앞서 언급한 바와 같이, 위상배열 안테나는 안테나의 기계적 움직임 없이 전기적으로 안테나 빔 조향이 가능하므로 이동형 위성통신 안테나와 레이더(radar) 등의 고기능, 고성능 안테나로 각광 받고 있다. 이 위상배열 안테나의 방사패턴 조향은 각 배열 소자 안테나에 도달하는 전파의 위상을 동일하게 맞춤으로써 가능하게 된다.[8]

본 논문에서는 이러한 위상배열 안테나로 활용할 수 있으며, 기계적 및 전기적 특성이 모두 우수한 스마트 스킨 안테나를 제시하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위상배열로 응용하기 위한 스마트 스킨 안테나에 대한 기본 설계 예를 보이고, 레이돔이 결합된 경우와 없는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 비교 분석하였다. 그리고, 3장에서는 이렇게 설계된 스마트 스킨 안테나를 제작하여 안테나 특성시험을 하였고, 마지막 4장에서 결론을 보였다.

## 2. 스마트 스킨 안테나 설계

스마트 스킨 안테나는 표면 구조체 일체형 안테나로서, 기계적 특성뿐만 아니라 전기적 특성 모두 만족해야 한다. 기계적 특성으로는 중량은 가벼우면서 강도가 우수해야 할 것이고, 전기적으로 안테나 방사 특성이 우수해야 할 것이다. 본 논문에서는 기계적 특성을 고려하여 허니콤 샌드위치 구조를 이용하였고, 전기적 특성을 고려하여 적층 제작이 용이한 마이크로스트립 패치 안테나 구조를 이용하였다. 특히, 표면 구조체 안테나가 위상배열이 용이하도록 동축 프루브 급전(coaxial probe-fed excitation) 방식을 이용하였다.

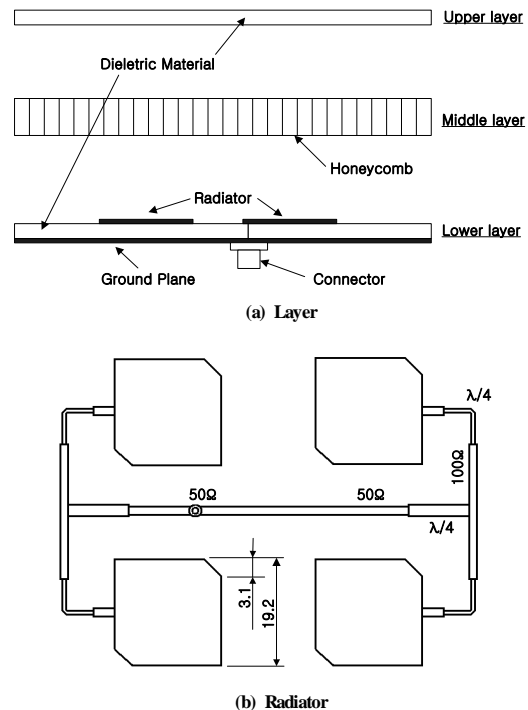
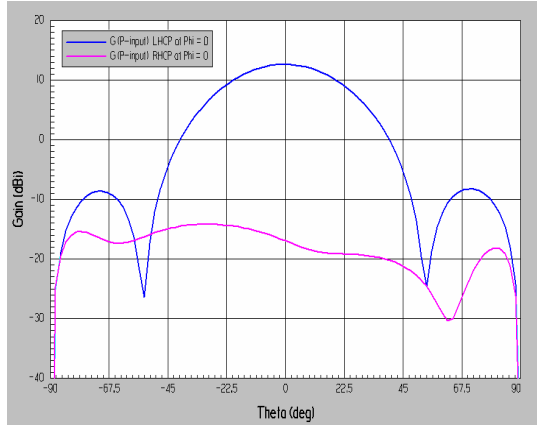


Fig. 2 Design example of smart skin antenna for phased array.

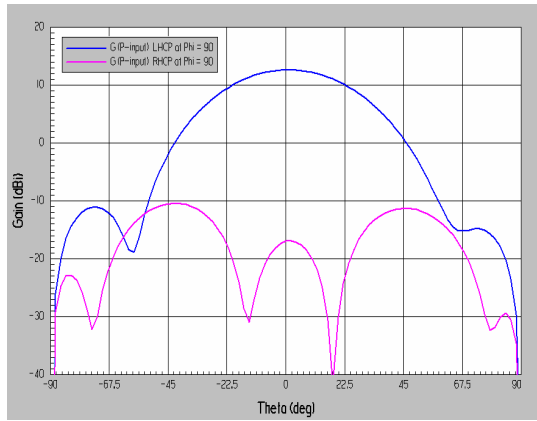
이와 같이, 설계된 스마트 스킨 안테나 설계 예를 Fig. 2에 나타내었다. 재료적층 기본 순서는 안테나 방사소자 역할을 하는 lower layer, 안테나 레이돔 역할을 하는 upper layer, 그리고, 기계적 강도를 높이기 위해 허니콤 심재로 이루어진 middle layer로 구성된다. 각 층에 이용된 재료의 기계적 및 전기적 특성을 Table 2에 나타내었다. 레이돔 층과 방사소자 층의 재료는 유전율 2.4 인 Rogers 사의 ULTRAM2000 기판으로서 재질은 PTFE woven glass로서 높은 주파수나 높은 온도에서도 비교적 일정한 유전율을 유지하며 삽입손실이 적은 장점이 있다. 그리고, 허니콤 심재 층은 Hexel 사의 HRH-10-1/8-6.0 허니콤을 삽입하였다. 여기서, HRH-10은 제품의 일련번호이며, 1/8은 육각형의 지름이 1/8 inch 임을 나타내고, 6.0은 허니콤의 밀도로 6.0 lb/ft<sup>3</sup>이다. 허니콤의 유전율은 1.1로 공기와 유사하고, 가벼울 뿐만 아니라, 외부 충격에도 잘 견디고, 높은 압축강도를 지니는 등 기계적 특성이 우수하다.

안테나 방사 소자는 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이, 2×2 부배열(subarray)로서 공진 주파수 5 GHz, 원형편파로 설계하였다. 방사소자는 반파장 패치로서 크기 19.2 mm 정사각형이다. 이 크기는 식 (1)의 근사값으로부터 설계될 수 있다. [6]

$$L \approx 0.49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$



(a) E-plane



(b) H-plane

Fig. 3 Simulated radiation pattern of designed smart skin antenna.

Table 1 Specification of smart skin antenna

Item	Specification
Resonant frequency(GHz)	5.0
Polarization	Circular
Array type	2×2 microstrip patch
Connector	50Ω coaxial

그리고, 원형편파를 생성하기 위해 모서리를 3.1 mm 제거하였다. 또한, 방사소자 간격은 상호간섭(mutual coupling)을 최소화하기 위해  $0.6\lambda$ 로 하였으며, 50 Ω 동축 프루브 급전을 위해  $\lambda/4$  변환기(transformer)를 이용하여 임피던스 매칭을 하였다. 임피던스 매칭은  $Z_1$ 에서  $Z_2$ 로 변환되기 위해서는 식 (2)에 의해  $Z_1$  임피던스를 가지는 전송선로 길이  $\lambda/4$ 로 정합시킬 수 있다.[6]

Table 2 Material property

Material	Property
Upper/Lower Layer PTFE woven glass ULTRAM2000 60 mils Rogers co.	Elastic Modulus:
	11.7 GPa (x-dir)
	9.0 GPa (y-dir)
	Tensile Strength:
	147 MPa (x-dir)
	136 MPa (y-dir)
Middle layer Nomex honeycomb 200 mils Hexel co.	Dielectric constant: 2.4
	Loss tangent: 0.0022
	Compressive strength: 4.8 MPa
	Dielectric constant: 1.1
	Loss tangent: ~0

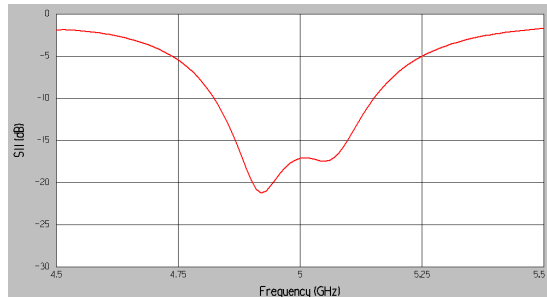
$$Z_t = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (2)$$

스마트 스킨 안테나의 전기적 특성 설계를 위하여 Ansoft사의 Ensemble(ver 6.0) 상용 소프트웨어를 이용하였다.

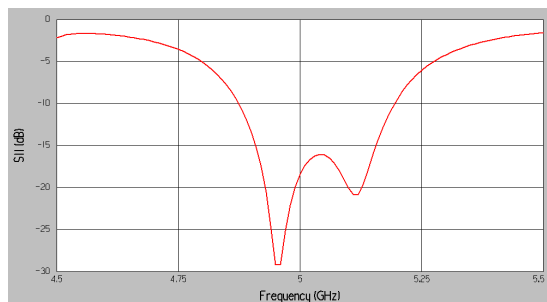
전자기 수치해석은 우선 레이돔이 결합된 스마트 스킨 안테나에 대해 수행하고, 그 후 레이돔이 없는 순수 마이크로스트립 패치 안테나(microstrip patch antenna)에 대한 결과와 비교 분석하였다. 그 수치해석 비교표를 Table 3에 나타내었다. 레이돔이 결합된 스마트 스킨 안테나가 경우의 이득이 12.6 dBi로 오히려 레이돔이 없는 경우보다 다소 증가한 것을 볼 수 있다. 레이돔이 전파(electric wave)의 전파(propagation)를 방해할 것으로 쉽게 생각할 수 있으나, 오히려 레이돔 층을 고려하여 설계한다면 본 결과와 같이 안테나의 이득을 증가시키는 효과를 가져올 수 있다.

한편, 레이돔이 제거된 경우 공진 주파수가 5 GHz에서 5.04 GHz로 다소 이동하였다. 이러한 이유로, 5 GHz에서의 축비(axial ratio) 특성이 나쁘게 나타났다. 여기서 축비(axial ratio)란, 안테나에서 방사되는 전파의 장축방향의 전계강도와 단축방향의 전계강도 비를 뜻하며, 1이면 완전 원형편파를 의미하고 무한대이면 선형편파를 의미한다. 그리고, Fig. 3는 안테나 방사패턴으로 3 dB 빔폭은 40° 정도이며, 부엽레벨은 -20 dB 정도로 전반적인 안테나 성능 또한 양호하다. 또한 Fig. 4와 Fig. 5에는 레이돔이 있는 경우와 없는 경우의 전자기 수치해석에 의한 반사손실(return loss)와 축비(axial ratio)를 각각 보였다. 원형편파 마이크로스트립 패치 안테나로서 이중 공진 특성을 보이면서 입력 임피던스에 의한 대역폭이 비교적 넓다.

이러한 여러 결과를 볼 때, 스마트 스킨 안테나 설계시 레이돔이 결합된 통합구조를 고려하여 안테나를 설계해야 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 본 논문에서 제시한 스마트 스킨 안테나 설계는 양호한 것으로 평가된다.

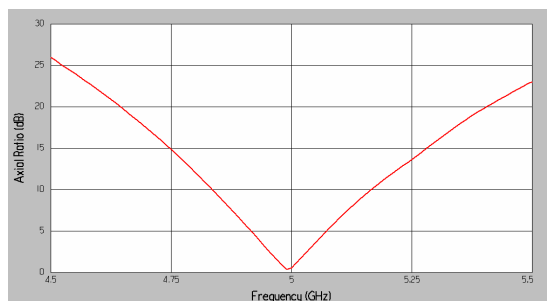


(a) With radome

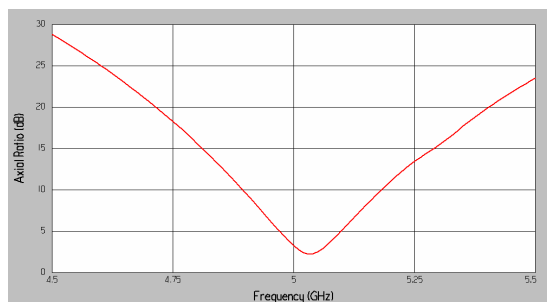


(b) Without radome

Fig. 4 Simulated return loss designed smart skin antenna.



(a) With radome

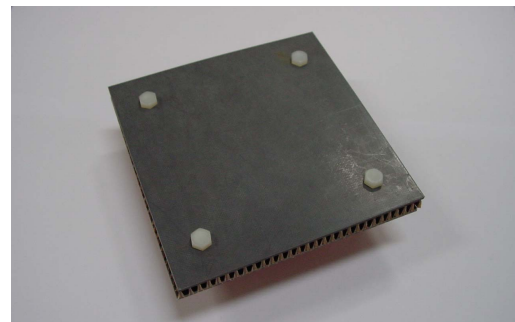


(b) Without radome

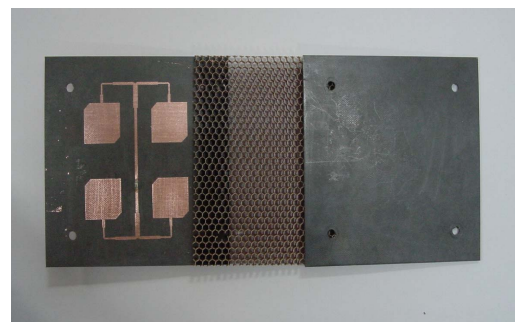
Fig. 5 Simulated axial ratio designed smart skin antenna.

### 3. 스마트 스킨 안테나 제작 및 결과

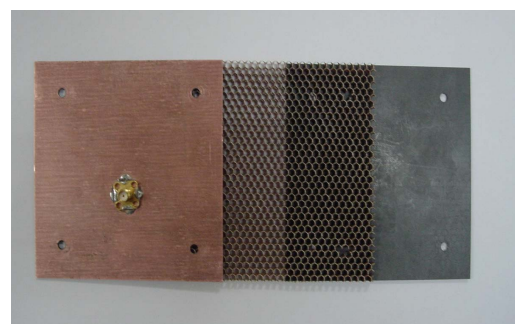
앞서 설계된 스마트 스킨 안테나의 제작 형상은 Fig. 6과 같다. 사진에서 보인 바와 같이, 3개의 층으로 이루어져 있으며, 각 층을 서로 결합하기 위해서 4개의 유전체 볼트를 이용하였다. 유전체 볼트 대신 유전율과 낮고 두께가 얇은 접착필름으로 접합할 수도 있다. Fig. 6(c)의 안테나 방사소자 층 뒷면을 보면 50 Ω 동축 커넥터가 있다. 이러한 급전 방식은 앞서 설명한 바와 같이, 표면 구조체 뒷면에서 급전할 수 있기 때문에 위상배열 안테나로의 활용을 가능하게 한다.



(a) Assembly view



(b) Explosive front-view



(c) Explosive rear-view

Fig. 6 Fabricated smart skin antenna.

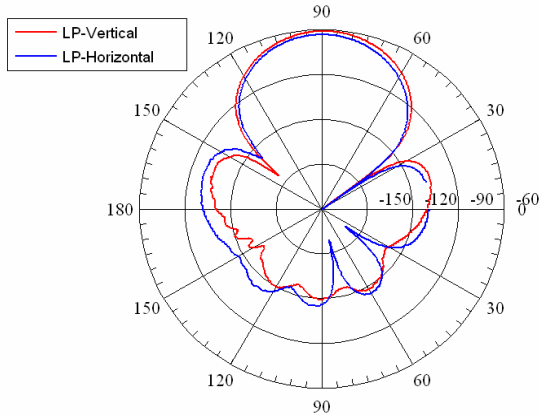


Fig. 7 Measured radiation pattern of fabricated smart skin antenna.

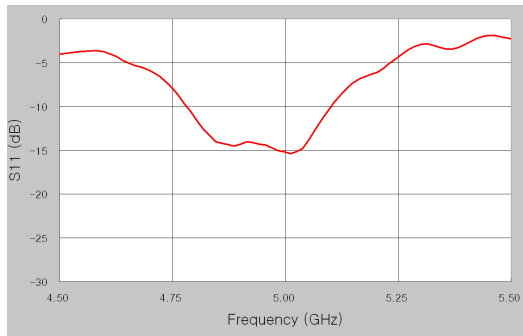


Fig. 8 Measured return loss of fabricated smart skin antenna.

제작된 스마트 스킨 안테나의 전기적 성능을 알아보기 위해 우선 네트워크 분석기(network analyzer)를 이용하여 반사계수 S11을 측정해 본 결과 설계 공진 주파수 5 GHz에서 -15.1 dB 이며, 가용 주파수 대역폭(VSWR<2)은 6.4 % 로 시뮬레이션 결과와 유사하였다. 그리고, POSTECH Compact Range에서 안테나 방사패턴을 측정하였다. 설계된 안테나는 원형편파 안테나로서, 이중-선형 패턴법(dual-linear pattern method)[6]을 이용하여 H-plane에 대한 수직 및 수평 선형편파(linear polarization)에 대한 방사패턴을 측정하였다. 그 측정 결과, H-plane에 대한 방사패턴은 Fig. 7과 같다. 이 방사패턴 결과 데이터로부터 부레벨은 -35.7 dB 그리고, 원형편파의 성능을 나타내는 축비(axial ratio)는 1.5 dB 정도를 보인다. 한편 네트워크 분석기에 의해 측정된 반사 손실은 Fig. 8과 같이 5 GHz 공진이 일어나고 있으며 대역폭은 6.4 %로서 수치해석 결과와 유사하다.

제작된 안테나 이득을 측정하기 위하여 표준 안테나를 이용한 이득비교법[6]을 이용하였으며, 그 결과 12.2 dBi를 얻었다. 주요 안테나 성능을 Table 4에 수치해석 결과와 함께 측정결과를 기록하였다. 그 결과가 전반적으로 제작 성능이 수치해석 결과와 유사하며 그 특성 또한 양호함을 확인할 수 있다.

Table 3 Simulated performance of radome effect for smart skin antenna

Item	With radome	Without radome
Gain(dB)	12.6	12.5
Sidelobe level(dB)	-20.8	-18.8
Axial ratio(dB)	0.39 (2%)	3.27
Return loss(dB)	-17.1 (6.6%)	-18.4 (6.4%)
Isolation of cross polarization(dB)	-29.6	-14.6

Table 4 Performance of smart skin antenna

Item	Simulation	Measurement
Gain(dB)	12.6	12.2
Bandwidth(%)	6.6	6.4
Axial ratio(dB)	2.0	1.5
Sidelobe level(dB)	-20.8	-35.7
Isolation of cross polarization(dB)	-29.6	N/M

N/M : Not Measured

#### 4. 결 론

본 논문에서는 위상배열 안테나로 활용할 수 있는 스마트 스킨 안테나를 소개하였다. 스마트 스킨 위상배열 안테나는 표면 구조체와 통합된 안테나로서, 가벼우면서도 높은 기계적 강도를 가지기 위해 허니콤 샌드위치 구조를 이용하였으며, 위상배열이 용이하도록 동축 프루브 급전(coaxial probe-fed excitation) 방식으로 설계하였다. 그리고, 5 GHz, 원형편파, 2x2 부배열로된 단일 배열 안테나를 제작하여 그 전기적 성능 또한 양호함을 확인하였다. 한편, 레이돔이 없는 경우에 대해서도 고찰하였으며, 그 결과 안테나 설계시 레이돔을 고려한 통합 설계가 필요함을 알 수 있다. 본 논문에서 제시한 스마트 스킨 부배열 안테나를 확장 배열함으로써 완전한 위상배열 안테나로 구현될 것이다. 이러한 스마트 스킨 안테나는 자동차 및 항공기 등의 이동체 표면 구조물 일체형 안테나로 널리 활용될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- 1) Howard G. Allen, "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels," Pergamon Press, 1969.
- 2) J. Tuss, et al., "Conformal Load Bearing Antenna Structures (CLAS)," 37th AIAA SDM Conference, 1996, pp. 836-843.
- 3) A. J. Lockyer, et al., "Design and Development of a Conformal Load-Bearing Smart-Skin Antenna: Overview of the AFRL Smart

- Skin Structures Technology Demonstration (S<sup>3</sup>TD)," Part of the SPIE Conference on Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, Vol. 3674, 1999, pp. 410-424.
- 4) C. S. You, et al., "Design and fabrication of composite smart structures for communication, using structural resonance of radiated field," Smart Materials and Structures, Vol. 14, 2005, pp. 441-448.
  - 5) C. S. You and W. Hwang, "Design of Load-bearing Antenna Structures by Embedding Technology of Microstrip Antenna in Composite Sandwich Structure," Composit Structure, Vol. 71, issue 3-4, 2005, pp. 378-382.
  - 6) W. L. Stutzman, et al., "Antenna Theory and Design," Wiley, 1998.
  - 7) K. F. Lee and W. Chen, "Advances in Microstrip and Printed Antenna," Wiley, 1997.
  - 8) R. C. Hansen, "Phased array antennas," Wiley, 1998.