

구조 실험 및 응력 해석을 통한 복사 소자의 안전성 평가

김진율* · 김동섭* · 박병락* · 김진성** · 김민성*** · 박찬익*** · 황운봉*†

Safety Evaluation of Radiating Element by Structural Test and Stress Analysis

Jin-Yul Kim*, Dong-Seob Kim*, Byung-Rak Park*, Jin-Sung Kim**, Min-Sung Kim***, Chan-Yik Park***, Woon-Bong Hwang*†

ABSTRACT: This study manufactured the radiating element of multi-band antenna skin structure which satisfy electrical and mechanical performance and is made by double injection molding process. Structural test including impact and buckling test is carried out and stress analysis is simulated to evaluate safety of radiating element for the axial and shear loads, when changing of the skin structure is occurred by the external force. To predict allowable load of structure and evaluate safety on impact and buckling, experimental and analytic method is used in strength analysis of structure.

초 록: 본 연구에서는 기계적·전기적 기능을 모두 만족하는 다중대역 스킨구조물에서의 복사 소자를 2중 사출으로 제작하였다. 추후 외부 스킨 구조 변형에 따른 복사 소자의 안정성을 검증하기 위하여 충격 및 좌굴에 대한 시험과 축 하중과 전단 하중에 대한 강도 해석을 실시하였다. 그리고 다중 대역 안테나 스킨 구조의 복사 소자에 대한 실험적 방법과 해석적 방법을 통한 강도 분석 결과, 구조의 허용 하중을 예측하고 충격과 좌굴에 대한 안전성을 평가할 수 있었다.

Key Words: 복사 소자(radiating element), 구조 실험(structural test), 응력 해석(stress analysis), 안전성 평가(safety evaluation)

1. 서 론

운송체의 중량 감소, 제작비 절감, 성능 향상 등을 목표로 스마트 재료를 항공기 및 선박 등의 구조체에 적용하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구는 통신 분야의 요구와 아울러 복합재료 항공 구조 응용 확산에 맞물려 미국을 중심으로 시작되었다. 연구를 통해 개발된 구조를 스마트 스킨(Smart skin) 또는 CLAS(Conformal load-bearing antenna structure)라 부르며 안테

나 기능을 가지면서 운송체의 구조물에 부과되는 강도, 강성 등의 구조적인 요구 조건을 만족하기 위하여 기술의 축적이 지속적으로 이루어지고 있다[1-3]. 국내에서는 복합재료 샌드위치 구조물에 평면 안테나 기판을 구조물 내부에 삽입하여 구조적·전기적 역할을 동시에 하는 복합재료 안테나(Composite antenna structures) 연구가 활발히 진행되었다[4-8]. 이러한 기술 발전을 기반으로 실제 항공기에 적용하기 위한 목적을 가지고 비행체의 항력, 중량 및 RCS 감소를 위하여 안테나 기능과 하중 지지 구조 역할을

접수: 2013년 6월 20일, 게재승인: 2013년 8월 26일

*포항공과대학교 기계공학과

*†포항공과대학교 기계공학과, Corresponding author (E-mail: whwang@postech.ac.kr)

**삼성탈레스

***국방과학연구소

동시에 할 수 있는 내장 스킨 구조 기술 개발이 이루어지고 있다. 항공기에 적용하기 위한 구조적 목표 성능을 살펴보면 다음과 같다.

- 축 하중: 1,800 lb/in
- 전단 하중: 600 lb/in
- 충격 하중: 4 lb-ft에서 손상 미발생
- 수직방향으로 4,000 $\mu\epsilon$ 까지 좌굴 미발생

Fig. 1은 다중대역 안테나 스킨 구조를 나타내고 있으며 본 논문에서는 복사 소자 자체만의 기계적 거동 특성을 확인하였다. Fig. 2에서 보듯이 복사 소자는 안테나 기판과 복합 매질로 제작된 커버로 구성된다. 기판이 가운데 있으며 기판의 구멍을 통해 양면의 복합 매질이 연결되어 있는 구조이다. 구멍을 통해 안테나 기판과 복합 매질의 접착을 하게 되며 접착 강도를 유지하기 위해 다양한 크기와 많은 수의 구멍이 존재하게 된다. 제작 공정은 2중 사출 성형을 사용하며 다음과 같다. 몰드 속에 안테나 기판을 삽입하여 일차적으로 액체 형태의 복합 매질을 사출한 뒤 반대면 쪽으로 이차적으로 복합 매질을 주입하여 액체 형태의 복합 매질이 기판의 구멍 사이로 양쪽의 면인 복합 매질을 잡아주는 방식이다. 복사 소자의 주 구조체 역할을 하는 복합 매질은 플라스틱과 페라이트를 이용하여 제작된다. 복합 매질 속에 페라이트는 전기적 성능 향상을 위해 첨가하였다. 복사 소자의 크기는 300 mm × 300 mm × 6 mm이다. 안테나 기판 크기는 292 mm × 292 mm × 0.4 mm이며, 중앙에 위치하고, 커버인 플라스틱이 중앙부의 안테나 기판을 감싸고 있는 형태이다. 특히, 플라스틱은 안테나 기판의 가장 자리

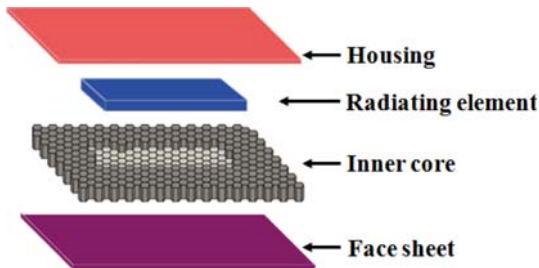
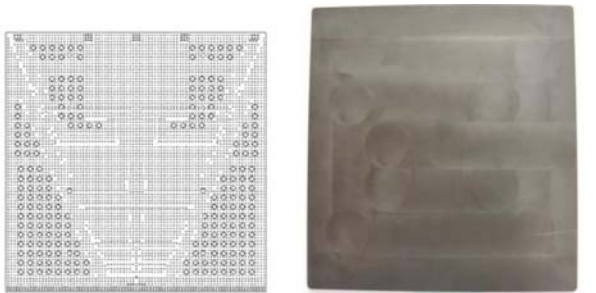


Fig. 1. Antenna skin structure for multi band.



(a) Log periodic antenna substrate (b) Manufactured radiating element

Fig. 2. Antenna substrate and radiating element.

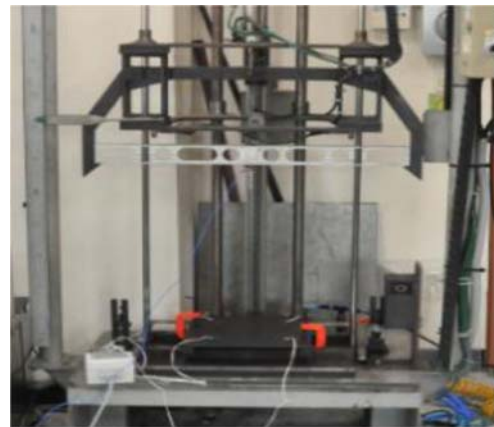
에서 4 mm의 여유를 두고 같은 재질로 접착된다.

본 연구의 목표는 복사 소자의 기계적 거동 특성을 파악하여 추후 외부 스킨 구조 변형에 따른 복사 소자의 안전성을 해석적 방법과 실험적 방법으로 보증하고, 그 기술적 방법을 확보는 것이다. 기계적 거동 특성 파악이 힘든 축 하중과 전단 하중에 대해서는 해석적 방법으로 접근하였고, 충격 및 좌굴에 대해서는 실험적 방법으로 구조적 안전성을 검증하였다.

2. 복사 소자의 구조 실험 및 해석

2.1 복사 소자의 구조 실험

충격 실험은 JSSG-2006(Joint Service Specification Guide-Aircraft Structures)에 준해 실험을 실시 하였다. Fig. 3(a)는 충격 실험 전경을 보여 준다. 적용 충격에너지는 구조적 목표 성능인 4 lb-ft이다. 특히, 충격에너지는 1.17 kgf 무게를 가지는 추를 470 mm의 높이에서 떨어트려 목표 에너지를 부가 하였다. 충격 후, 시편의 움직임을 방지하기 위해 Fig. 2(a)에서 보는 것과 같이 C형 클램프를 이용하여 시편을 고정하였다. 3개의 시편을 이용하여 시험을 실시하였다. 그리고, Fig. 3(b)에서 보듯이 시편에 충격체가 닿을 때, 시편의 거동을 살펴보기 위하여 시편의 중심으로부터 모서리까지의 중앙부 위치에 4개의 변형률게이지를 부착하여 변



(a) Specimen fixture



(b) Measured positions of specimen surface

Fig. 3. Impact test.

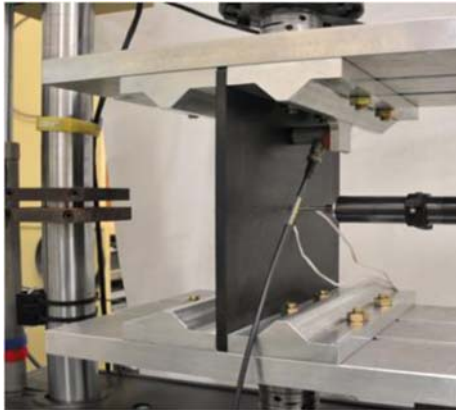


Fig. 4. Buckling test.

형률을 측정하였고, 충격 후에는 현미경을 이용하여 시편의 충격 부위를 확대하여 손상을 살펴보았다.

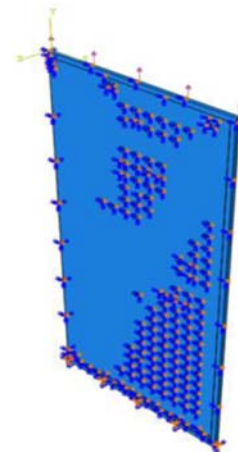
Fig. 4는 좌굴 실험 전경을 보여준다. 시편은 양단을 고정하여 실험을 실시하였다. 변위 제어로 0.5 mm/min의 속도로 하중을 부과하였다. 변위 측정 센서인 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 측면 변위를 측정하였고, 좌우측면에 변형률게이지를 부착하여 측면 변형률을 측정하였다. 또한, 복사 소자의 내부적 거동을 정량적으로 파악하기 위하여 AE(Acoustic Emission) 방법을 이용하여 거동을 분석하였다.

2.2 복사 소자의 구조 해석

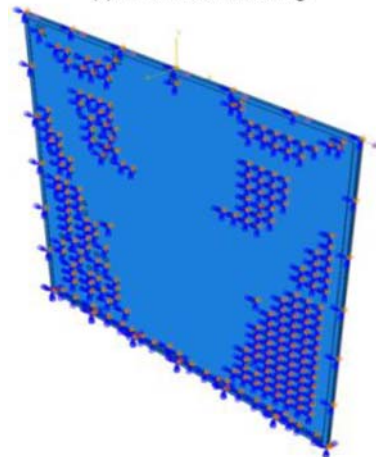
복사 소자의 해석에 필요한 복사 소자의 물성은 Table 1과 같다. 복합 매질의 물성은 시험을 통해 확보한 결과이고, 안테나 기판의 경우는 제조사(두산)에서 제시하는 결과를 사용하였다. 구조 해석은 ABAQUS 6.10을 이용하여 유한요소 해석을 수행함으로써 축 하중과 전단 하중에 대한 안정성을 해석적으로 확인하였다. 복사 소자는 안테나 기판과 복합 매질 두 재료 간의 경계에서의 거동을 살펴 보아야 하기 때문에 3D 모델링을 하였고, 모델링 시에 복사 소자 전체 크기와 제작 방법 역시 고려하였다. 특히, 복사 소자가 구조적으로 많은 접촉면을 가지기 때문에 정적 비선

형 문제를 해석할 때 사용하는 ABAQUS/Explicit 방법으로 해석을 실시하였다.

안테나 기판에는 복합 매질의 접착을 위해 다양한 크기의 구멍이 존재하게 된다. Fig. 2(a)에서 보듯이 모든 구멍을 모사하여 해석을 수행하는데 어려움이 있기 때문에 실제 거동에서 접착 영향이 작게 여겨지는 0.8 mm 구멍은 무시하여 모델링 하여 해석을 수행하였다. 그리고, 안테나 기판의 커버인 복합 매질은 접착물질 없이 단순히 구멍을 통과하여 기판을 고정하고 있는 마찰은 무시하여 해석을 수행하였다. 축하중의 경우는 Fig. 5(a)와 같이 길이방향과 두께 방향으로 각각 1/2 대칭 모델을 사용하였으며, 축 하중은 한 면을 완전 고정 후, 반대 면에 하중을 적용하였다. 하중은 면압으로 환산하여 상단부에 적용하였다. 전단 하중은 Fig. 5(b)에서 보는 것과 같이 두께 방향으로 1/2 대칭 모델을 사용하였다. 면을 완전 고정한 후에 반대 면을 따라 하중을 적용하였다. 그리고, 사용된 복합 매질은 플라스틱 속에 페라이트가 존재함에 따라 제작 시 재료의 균질성을 확보하기 위해 제조 과정에서 공정 최적화를 실시하였다. 4면에 걸쳐 물성시험 시편을 제작하였는데 시험 종류 별로



(a) Axial load modeling



(b) Shear load modeling

Fig. 5. Analysis models.

Table 1. Material properties of radiating element

Properties	Complex media	Antenna substrate
Density (g/cm ³)	1.51	1.9
Elastic modulus (GPa)	9.1	24.0
Poisson's ratio	0.39	0.19
Tensile strength (MPa)	86.3	300.0
Compressive strength (MPa)	119.7	500.0
Flexural strength (MPa)	116.0	500.0
Shear strength (MPa)	45.6	175.0

Properties of complex media obtained from experiments in POSTECH

10개의 시편을 사용하여 시험을 실시하였다. 물성의 여유 (Margin)을 고려하여 시험 결과를 합리적으로 가져가기 위해 MIL-HDBK-17-1F에서 B-basis 기초로 하여 허용 물성치를 산정하고, 복사 소자가 견딜 수 있는 허용 축 및 전단 강도를 제시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 구조 실험 결과 및 분석

Fig. 6(a)는 시편 1에 4lb-ft 충격이 가해진 시험 시편 중앙부를 60배 확대하여 살펴본 결과를 보여준다. 시편 3개 모두 Fig. 6(a)와 같이 동일하게 충격에도 파손이 발생되지 않았으며, 표면에는 충격체가 낙하하여 찍힌 흔적이 나타났으나 균열과 같은 손상이 발생되지 않았다. Fig. 6(b)는 시편 1의 4번 위치 변형률을 보여준다. 이러한 결과는 3시편 중에서 가장 큰 변형률을 보여주었다. 시간에 따라 일정한 형태로 진폭이 증가하고 이는 시험에서 충격 후 발생하는 추의 상하 진동과도 일치하는 결과이다. 그리고, Table 2는

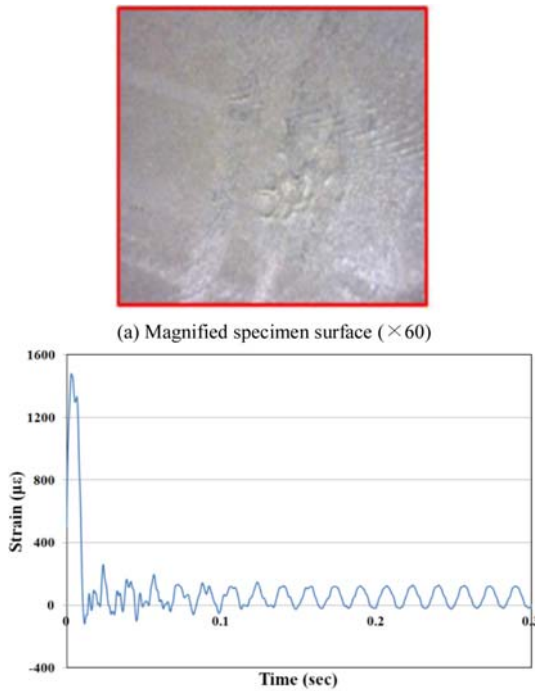


Fig. 6. Results of impact test.

Table 2. Strain results of impact specimens

Specimens	Strain of 1 point (µε)	Strain of 2 point (µε)	Strain of 3 point (µε)	Strain of 4 point (µε)
Specimen 1	1,164.8	659.7	713.1	1,479.9
Specimen 2	1,374.7	919.4	829.6	1,245.3
Specimen 3	1,187.7	684.5	823.0	1,364.1

이러한 결과를 토대로 시편 3개의 위치 별 변형률 결과를 보여 준다. 제작된 복사 소자를 이용하여 인장 시험을 한 결과 파단 변형률은 3,533 µε를 나타내었다. 충격 시 발생하는 최대 변형률 결과를 토대로 살펴보면 시편 3개에 최대 나타난 변형률의 평균이 1,400 µε으로 나타나 구조적 목표 성능인 4 lb-ft 충격에 대해 안전한 것으로 판단된다.

Table 3. Results of buckling specimens

Specimens	Peak load (kN)	Side disp. (mm)	Axial stain (µε)	Lateral strain (µε)
Specimen 1	18.6	9.5	5,861/-6,701	330
Specimen 2	18.6	7.4	5,411/-3,152	477
Specimen 3	19.5	8.8	6,207/-4,661	522

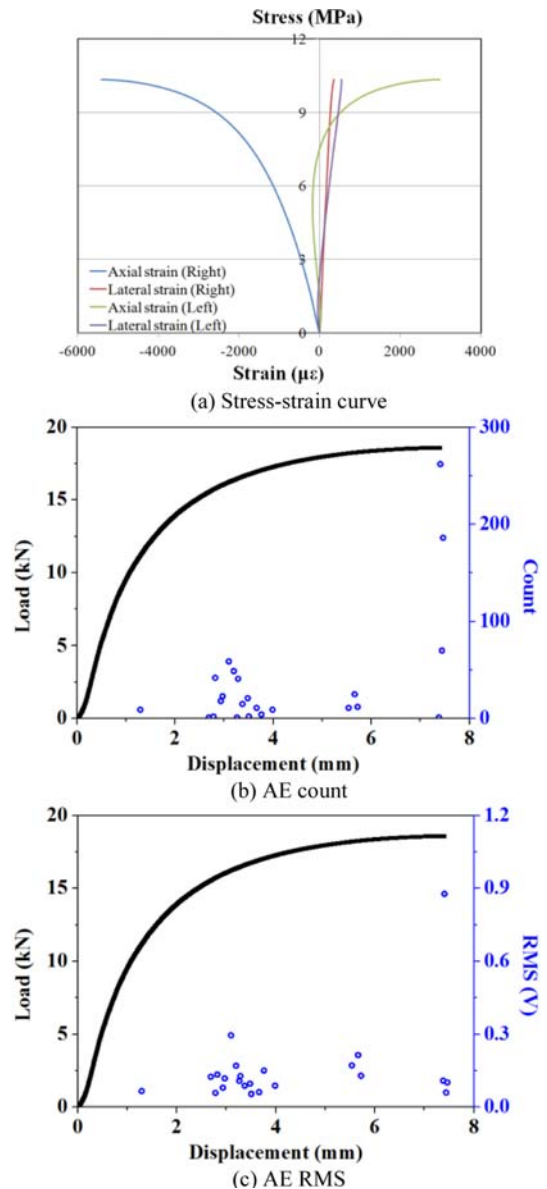


Fig. 7. Results of buckling test.

Table 3은 좌굴 실험에서 획득된 복사 소자 시편 별 외부 적 거동에 대한 결과를 보여준다. 3 시편에 대한 전체 평균 결과를 살펴 보면, 최대 하중이 19 kN이고, 측면 변위는 8.6 mm 발생하였다. 시편에 발생한 변형률을 살펴보면, 축방향 변형률은 좌·우측으로 5,826/-4,838 $\mu\epsilon$ 의 결과를 보였고, 하중이 작용하는 수평방향 변형률은 443 $\mu\epsilon$ 이 발생하였다. 이러한 결과를 토대로 수많은 구멍을 통해 안테나 기판을 잡고 있는 복합 매질에 발생된 변형률은 구조적 목표 성능인 4,000 $\mu\epsilon$ 의 결과를 보여 목표 성능을 만족하였다. 3 시편 모두 비슷한 결과를 보였으며, 시편 2의 하중-변형률 곡선인 Fig. 7(a)에서 보듯이 6 MPa 부터 좌굴이 시작되었음을 확인할 수 있었다. 복사 소자의 기계적 성능을 확보하기 위해서는 복합 매질이 안테나 기판을 잘 고정해야 한다. 시험 중에 작용되는 하중에 따른 내부의 거동을 살펴 보기 위해 AE 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 복사 소자의 2중 사출을 통한 제작 공정으로 인해 안테나 기판의 구멍을 통해 연결되어 있는 다양한 크기와 종류의 복합매질이 존재하게 된다. 이러한 복합매질 파단으로 많은 신호가 발생하게 되는데 판단 신호만을 획득하기 위해 문턱값(Threshold)을 0.1 V의 높은 값으로 하여 설정하였다. 여기서, Count는 방향 방출 신호의 발생 횟수를 의미하고, RMS는 신호의 평균값의 루트를 한 값으로 에너지를 의미하게 된다. Fig. 7(b), Fig. 7(c)의 AE 결과로부터 내부 거동을 살펴 보면 하중 11 kN일 때 부터 안테나 기판과 복합 매질의 계면 분리가 시작되었으며, 추후 다른 곳 까지 전이 되면서 기판을 고정하는 홀 사이에서 양면으로 서로 잡고 있는 복합매질이 떨어지면서 파괴가 갑작스럽게 진행됨을 AE 결과를 통해 확인할 수 있었다.

3.2 구조 해석 결과 및 분석

축하중의 경우, 구조적 목표인 1,800 lb/in를 면압으로 환산하여 상단부에 52.5 MPa의 압력을 적용하였다. 복합 매질에 발생하는 최대 응력은 356 MPa이고, 최대 변위는 1.6 mm가 발생되었고, 안테나 기판에는 최대 응력이 563 MPa, 최대 변위는 1.5 mm가 발생하였다. 이러한 결과는 주어진 구조적 목표 강도가 복사 소자에 직접적으로 작용하면, 복합 매질은 항복하는 것을 보여준다. 허용 하중을 제시하기 위하여 복사 소자 자체만으로 견딜 수 있는 인장 강도의 허용 물성치를 MIL-HDBK-17-1F의 B-basis를 참고한 결과, 허용 축 응력은 76.76 MPa임을 확인할 수 있었고 역 해석을 수행한 결과 허용 축 하중은 11.625 MPa이었다. Fig. 8(a)~(d)에서 보듯이 복합 매질에 75.9 MPa의 응력이 발생하고, 변위는 0.3 mm가 발생하였다. 안테나 기판에는 118.9 MPa의 응력이 발생하고, 변위는 0.3 mm가 발생하였다.

전단 하중에 대한 해석은 구조 목표 600 lb/in를 면압으로 환산하여 17.5 MPa의 면압으로 적용하였다. 그러한 결과, 복합 매질에 발생하는 최대 응력은 391 MPa이고, 최대 변

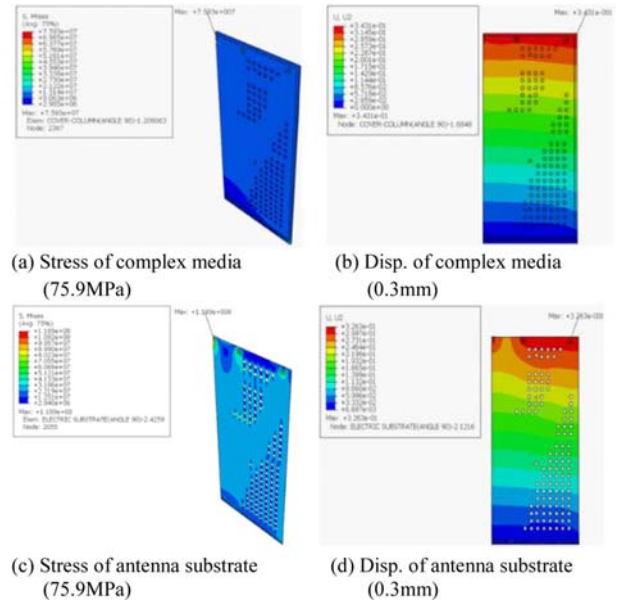


Fig. 8. Analysis results of allowable axial load.

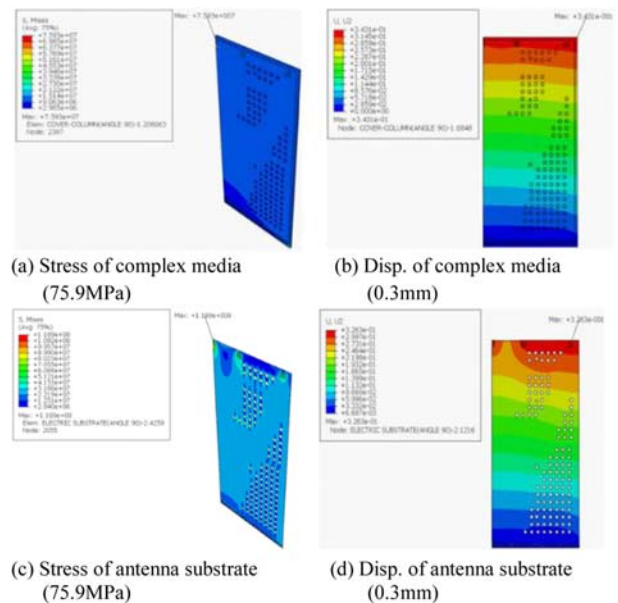


Fig. 9. Analysis results of allowable shear load.

위는 4.4 mm를 나타내었고, 안테나 기판에는 최대 응력이 518 MPa, 최대 변위는 4.3 mm가 발생하여 축하중과 동일하게 주어진 구조 목표에 대해 항복하였다. 복사 소자 자체만으로 견딜 수 있는 전단 강도의 허용 물성치를 MIL-HDBK-17-1F의 B-basis를 참고한 결과 허용 전단 응력은 20.1 MPa임을 확인할 수 있었고 역 해석을 수행한 결과 허용 전단 하중은 0.95 MPa이었다. Fig. 9(a)~(d)에서 보듯이 커버인 복합 매질에 19.4 MPa의 응력이 발생하고, 변위는 0.2 mm가 발생하였다. 안테나 기판에는 29.1 MPa의 응력이 발생하고, 변위는 0.2 mm가 발생하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 다중대역 안테나 내장 스킨 구조에서 여러 구성품 중 대수주기 안테나가 삽입된 복사 소자 자체만의 기계적 거동 특성을 살펴보기 위해 충격 및 좌굴 시험과 축 하중 및 전단 하중에 대해 해석을 실시하였다. 2중 사출 성형한 복사 소자 자체만의 결과를 살펴보면 4 lb-ft 충격에 대해서 안전한 것으로 나타났고, 좌굴 시험에서는 6 mm 두께를 가지는 복사 소자의 경우 6 MPa에서부터 좌굴이 발생하였고, 변형률은 구조 목표를 만족하였다. 구조 목표 강도에 대한 축하중과 전단 하중 해석 결과, 복사 소자는 항복하였다. 복사 소자 자체가 견딜 수 있는 허용 축하중은 11.6 MPa이고, 허용 전단하중은 0.9 MPa의 결과를 나타내었다.

참고문헌

1. Tuss, J., Lockyer, A.J., and Alt, K.H., "A Qualitative Assessment of Smart Skins and Avionics/Structures Integration," SPIE Smart Structures and Materials: Smart Materials, Salt Lake, UT, April, 1996, pp. 15-17.
2. Lockyer, A.J., Alt, K.H., Kudva, J.N., and Kinslow, R.W., "Conformal Load-bearing Antenna Structures (CLAS): Initiative for Multiple Military and Commercial Applications," *Proceeding of SPIE*, 1997, pp. 182-196.
3. Lockyer, A.J., Alt, K.H., Coughlin, D.P., Durham, M.D., Kudva, J.N., Geotz, 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)," *Proceeding of SPIE*, 1997, pp. 410-424.
4. You, C.S., and Hwang, W., "Design and Fabrication of Composite Smart Structures with High Electric and Mechanical Performances for Future Mobile Communication," *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 40, No. 3, 2004, pp. 237-246.
5. You, C.S., and Hwang, W., "Design of Load-bearing Antenna Structures by Embedding Technology of Microstrip Antenna in Composite Sandwich Structure," *Composite Structures*, Vol. 71, 2005, pp. 378-382.
6. You, C.S., Tentzeris, M., and Hwang, W., "Multilayer Effects on Microstrip Antennas for Their Integration with Mechanical Structures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 4, No. 4, 2007, pp. 1051-1058.
7. Kim, J.Y., Kim, D.S., Shin, D.S., Park, W.S., and Hwang, W., "Impact Evaluation of Composite-surface-antenna with Embedded Dual-band Annular Ring Patch Antenna," *Journal of composite materials*, Vol. 46, No. 22, 2012, pp. 2765-2775.
8. Lee, S.M., Cho S.H., Lee, C.W., and Hwang W., "Design and Impact Testing of Cylindrical Composite Antenna Structures," *The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 3, 2009, pp. 55-59.