

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(11), 891-899(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.11.891>

통신 항법용 다중대역 안테나 내장 스킨구조의 지상시험평가

김민성*, 박찬익, 조창민, 전승문

Ground Test & Evaluation of Conformal Load-bearing Antenna Structure for Communication and Navigation

Min-Sung Kim*, Chan-Yik Park, Chang-Min Cho and Seung-Moon Jun

The 7th Institute-2, Agency for Defense Development

ABSTRACT

This paper suggests a test and evaluation procedure of conformal load-bearing antenna structure (CLAS) for high speed military jet application. A log periodic patch type antenna was designed for multi-band communication and navigation antenna. Carbon/Glass fiber reinforced polymer was used as a structure supporting aerodynamic loads and honeycomb layer was used to improve antenna performance. Multi-layers were stacked and cured in a hot temperature oven. Gain, VSWR and polarization pattern of CLAS were measured using anechoic chamber within 0.15~2.0 GHz frequency range. Tension, shear, fatigue and impact load test were performed to evaluate structural strength of CLAS. Antenna performance test after every structural strength test was conducted to check the effect of structural test to antenna performance. After the application of new test and evaluation procedure to validate a new CLAS, a design improvement was found.

초 록

본 논문에서는 전투기 주구조물에 적용할 수 있는 안테나 내장 스킨구조(CLAS)의 새로운 시험평가 절차를 제시하였다. 대수 주기 패치형 안테나를 통신항법용 다중대역 안테나로 설계하였다. 탄소/유리 섬유 강화 적층 복합재(CFRP/GFRP)를 공력하중을 지지하기 위한 구조로 사용하고 안테나 성능 향상을 위해 하니컴 층을 적층하였다. 여러 재질로 구성된 다층구조의 안테나 내장 스킨구조를 고온의 오븐에서 경화하였다. 내장된 안테나의 이득, 전압 정재파비, 방사패턴을 0.15GHz~2GHz 주파수 범위에서 무반향 챔버시설을 이용하여 측정하였다. 안테나 내장 스킨구조의 구조강도를 평가하기 위하여 인장, 전단, 피로, 충격 하중을 부가하는 구조시험을 수행하였다. 각각의 구조시험 후에 안테나 성능시험을 수행하여 초기 값과 비교하므로써 구조시험이 안테나에 미치는 영향을 확인하였다. 새로 개발한 안테나 내장 스킨구조 시험평가 절차를 통신항법용 CLAS에 적용하여 설계개선이 필요한 점을 발견하였다.

Key Words : Conformal Load-bearing Antenna Structure(CLAS, 안테나 내장 스킨구조), Log Periodic Patch Type Antenna(대수주기 패치형 안테나), Voltage Standing Wave Ratio(전압정재파비), Multi-layered Structure(다층 구조)

† Received: August 15, 2013 Accepted: October 28, 2013

<http://journal.ksas.or.kr/>* Corresponding author, E-mail : castle@add.re.kr

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

I. 서 론

5세대급 항공기에 필수적으로 요구되는 스텔스 기술 중의 하나로서 안테나 내장 스킨 구조가 있다. 항공기 표면의 외부로 돌출된 블레이드 형식의 안테나는 스텔스 기능을 반감시키도록 레이더 반사면적, 공력하중에 의한 항력, 무게가 증가하는 단점이 있다. 이에 반하여 안테나 내장 스킨구조는 레이더 반사면적, 항력, 무게가 줄어드는 장점을 가진다. 또한, 참고문헌 [1]의 Fig. 3에서 정의한 1세대(Level 1) 안테나 내장 스킨구조는 단순히 외부형상(Outer Mold Line, OML)을 유지할 뿐 공력하중을 지지하지 못하지만 2세대(Level 2) 안테나 내장 스킨구조는 공력하중을 지지한다. 2세대 안테나 내장 스킨구조는 1세대 안테나 내장스킨구조에 비하여 간결한 구조, 가벼운 무게를 제공하는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 통신 항법용 안테나를 내장한 항공기 주구조물 강도를 가진 안테나 내장스킨구조를 시험평가 하였다. 내장된 안테나는 다수의 안테나를 한 개의 평면형 안테나로 구현한 다중대역 주파수를 가진다. 안테나의 무게, 크기, 이득과 전압정재파비를 요구조건으로 설정하였다. 전투기 주익 스킨구조 수준의 정적 강도와 피로강도 요구조건을 가지며 복합재 구조이므로 손상 허용설계가 가능하도록 충격강도 요구조건을 MIL-SPEC 기준으로 설정하였다.

평면형 안테나는 패치형 안테나, 스파이럴 안테나, 어레이 안테나 등이 있으나 본 연구에서는 다중대역을 동시에 구현할 수 있는 최적 설계로 대수주기 패치형식의 안테나 [2], [3]을 개발하였다. 안테나의 크기를 최소화하고 경량화 설계하였다.

안테나는 항공기 기체이면서 안테나이기 때문에 안테나 성능과 구조 강도를 확인할 수 있는 시험평가 방법을 본 논문에서 제안하였다.

II. 설 계

2.1 요구조건

본 논문의 안테나 내장 구조는 Table 1, 2와 같이 안테나와 구조 요구조건을 가지고 있다. Table 1에서는 안테나 이득, 주파수, 크기, 무게, 전압정재파비의 요구 값을 명기하였다. 안테나의 주파수 범위는 통신, 항법 안테나를 포함한다. 방사패턴(Polarization Pattern)은 Table 1에는 없지만 안테나의 성능예측을 위하여 시험항목에 포함

Table 1. CLAS requirements(antenna)

항 목	요구사항
주파수 [GHz]	0.15 ~ 2.0
이득 [dBi]	-3 이상(Nominal)
크기 [mm]	300(W) × 300(D) × 30mm(H)
무게 [kg]	1.2 이하
전압정재파비 (VSWR)	3.5 : 1 이하

Table 2. CLAS requirements(structure)

항 목	요구값
인장강도	1563 kg/cm
전단강도	521 kg/cm
충격강도	5.42 J: 육안손상없음 8.14 J: 수분침투없음
피로강도	6,000 비행시간

하였다. 안테나 요구조건 중 크기와 무게는 구조를 제외한 안테나 자체의 크기와 무게를 의미한다. 구조 요구조건은 전투기급 항공기의 주익 Root 스킨에 적용할 수 있을 정도의 강도 값이다. 3번째 구조 요구조건은 5.42 J 충격량을 부가할 때 육안으로 감지할 수 있는 손상이 없어야 하고 8.14 J 충격량을 가했을 때 수분침투가 없어야 한다.

2.2 CLAS 안테나 설계

Table 1과 2의 요구조건에 근거하여 새로운 대수주기 패치 형식의 안테나를 개발하고 Fig. 1과 같이 성능 향상을 위해 복사소자 안에 삽입하였다. 복사소자를 내장한 CLAS 구조의 외형은 Fig. 2와 같이 평면형으로 설계하였다. Fig. 2에서 CLAS의 외형은 정사각형 형상으로 한 변의 길이는 570 mm이고 두께는 11mm, 안테나 부 두께는 44mm 이다.

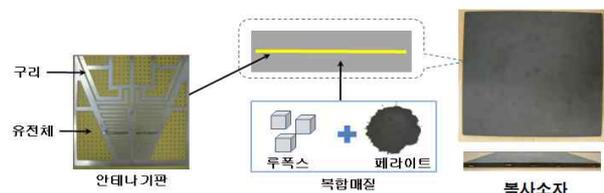


Fig. 1. Radiator with Embedded Patch Antenna

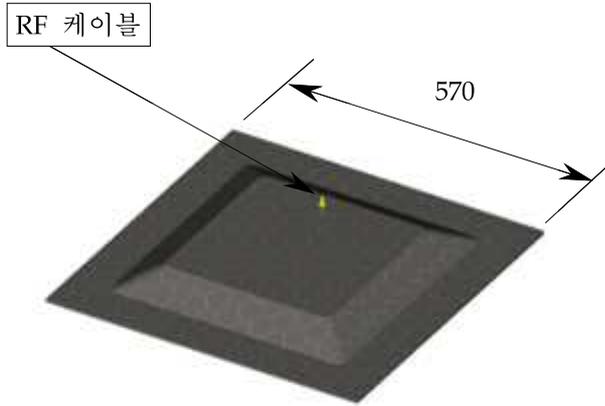


Fig. 2. CLAS Configuration and Size

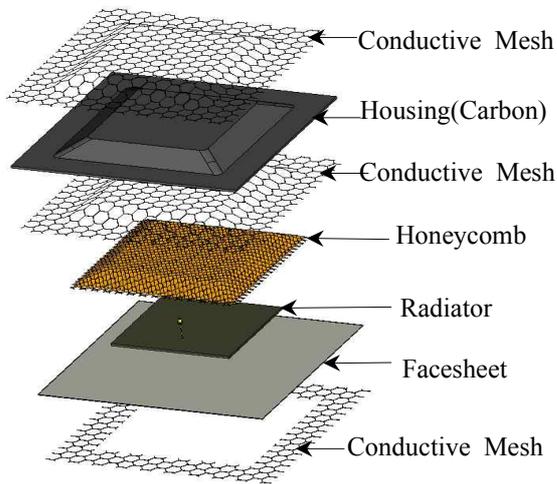


Fig. 3. New CLAS design

Figure 3에서는 CLAS의 층별 구성을 상세하게 도시하였다. 즉, 3개 층의 Conductive Mesh와 4개 층의 복합재 층, 총 7개의 층으로 구성하였다. 다중대역 안테나는 복사소자(Radiator)에 내장되어 있으며 Facesheet의 재질은 안테나 송수신을 자유롭게 하기 위하여 Glass/Epoxy 이다. Honeycomb 층은 안테나 성능을 구현하기 위한 공간을 제공하였다. Housing은 Carbon/Epoxy 재질로 후면 방향으로 안테나에 송수신되는 전파를 반사하기 위한 층이다.

III. 지상시험평가

3.1 지상시험평가 절차

안테나내장 스킨구조 시제품 형상의 시험평가에 대하여 가장 잘 묘사한 참고문헌 [5]에서는 전단시험과 인장시험을 한 번의 복합시험으로 실시하고 최대 변형율을 측정하여 요구도를 만족하

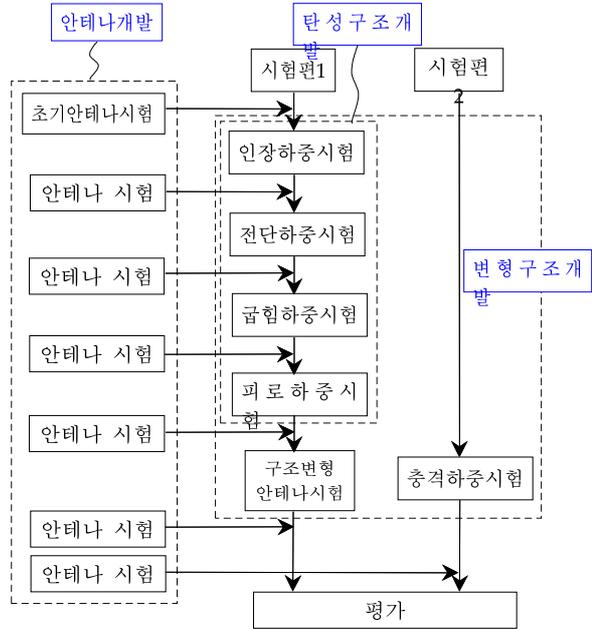


Fig. 4. Test & Evaluation Flow Diagram

는지 확인하였다. 또한, 피로시험을 수행하였으나 시험 후 안테나 성능에 대한 시험결과는 없다. 참고문헌 [1]에서는 구조시험수행 내용은 있으나 설계제작된 안테나 내장 스킨구조 및 안테나 성능시험 결과가 부족하고 참고문헌 [7]에서는 낙뢰시험 결과만을 기술하였다.

본 논문에서는 안테나 내장구조를 평가하기 위하여 안테나와 구조강도를 모두 확인할 수 있는 새로운 평가 절차를 Fig. 4와 같이 구성하였다. Fig. 4의 시험평가 절차는 안테나 개발 분야와 구조 평가분야를 포함하고 있으며 탄성변형 구조시험 후 영구변형 구조시험을 수행하는 흐름도이다. 1개의 시험편으로 탄성범위 내에서의 구조시험을 수행하고 다른 1개의 시험편으로 영구 변형되는 충격하중시험을 수행하도록 하여 시험편을 2개로 최소화하였다.

구조변형 안테나 시험을 마지막으로 수행하여 구조하중을 받는 안테나의 변형에 따라 안테나 성능 변화 유무를 확인하였다.

각 구조시험 후에는 안테나 시험을 수행하여 초기 안테나시험과 비교하므로써 구조시험의 영향을 안테나가 받는지 확인하도록 하였다.

3.2 인장하중시험

인장하중 요구조건인 1563kg/cm를 제작된 시제품 한 면의 길이를 고려하여 하중으로 변환하면 180 kN이다. 안테나 내장구조의 한쪽 면은 고정하였고 반대쪽 면에 분포하중이 부가되도록 치구를 제작하여 Fig. 5과 같이 재료시험기에 설



Fig. 5. Tension Load Test

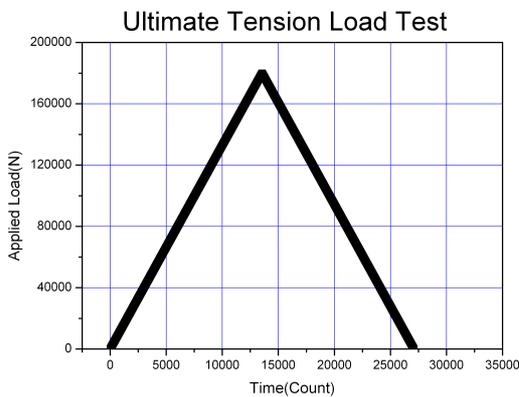


Fig. 6. Load-Time Curve for Tension Test

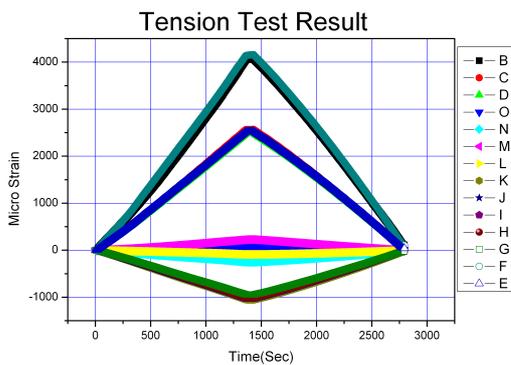


Fig. 7. Strain Outputs for Tension Test

치하였다. 인장하중은 Fig. 6의 그래프와 같이 선형적으로 작용하였고 변형률센서 측정 결과는 Fig. 7과 같이 시간에 대한 선형적인 변화를 보여주고 있다.

인장하중시험 후 이득, 전압정재파비(VSWR), 방사패턴과 같은 변수들을 측정하기 위해 안테나 시험을 수행하였다. 초기 안테나시험에서 수행한

변수들과 비교한 그래프를 Fig. 7, 8에서 각각 보여주고 있다. 전압정재파비는 반사손실 Γ 를 이용하여 식 1과 같이 구할 수 있다.

$$VSWR = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (1)$$

방사패턴은 인장시험 전/후에 저주파 대역 4개의 주파수에 대한 비교를 Fig. 9에서 보여주고 있다.

Figure 6, 7에서 인장시험 결과가 선형적으로 변화하였으나 Fig. 8에서 이득을 비교한 그래프는 0.9~1.2 GHz 대역에서 인장시험 전과 후의 이득이 차이를 보이고 있다. Fig. 9에서 전압정재파비는 전반적으로 시험 전/후의 차이가 발생하지만 주로 0.5 GHz 이하에서 큰 차이를 보여주고 있다. 안테나 시험결과 인장시험 후 안테나 성능은 저하되었지만 안정적으로 저하된 성능이 구현되었다. 즉, Fig. 8과 9의 빨간색 곡선의 성능이 안정적으로 발휘되므로 같은 시편으로 시험을 계속하였다.

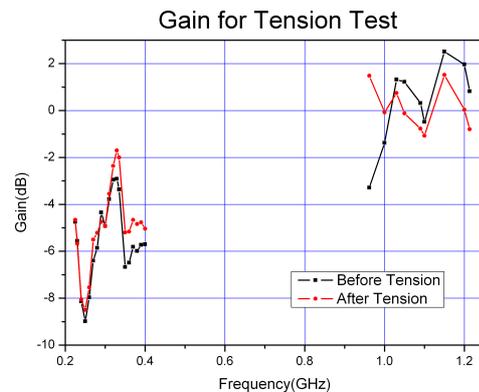


Fig. 8. Gains before and after Tension Test

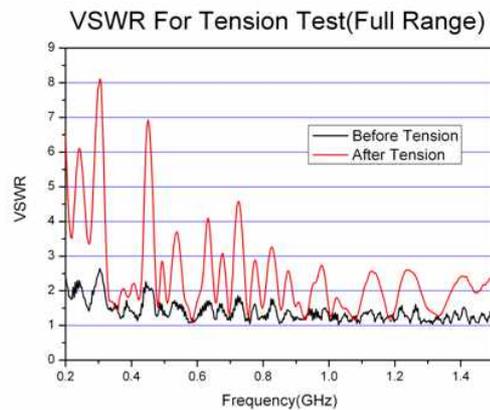


Fig. 9. VSWRs before and after Tension Test

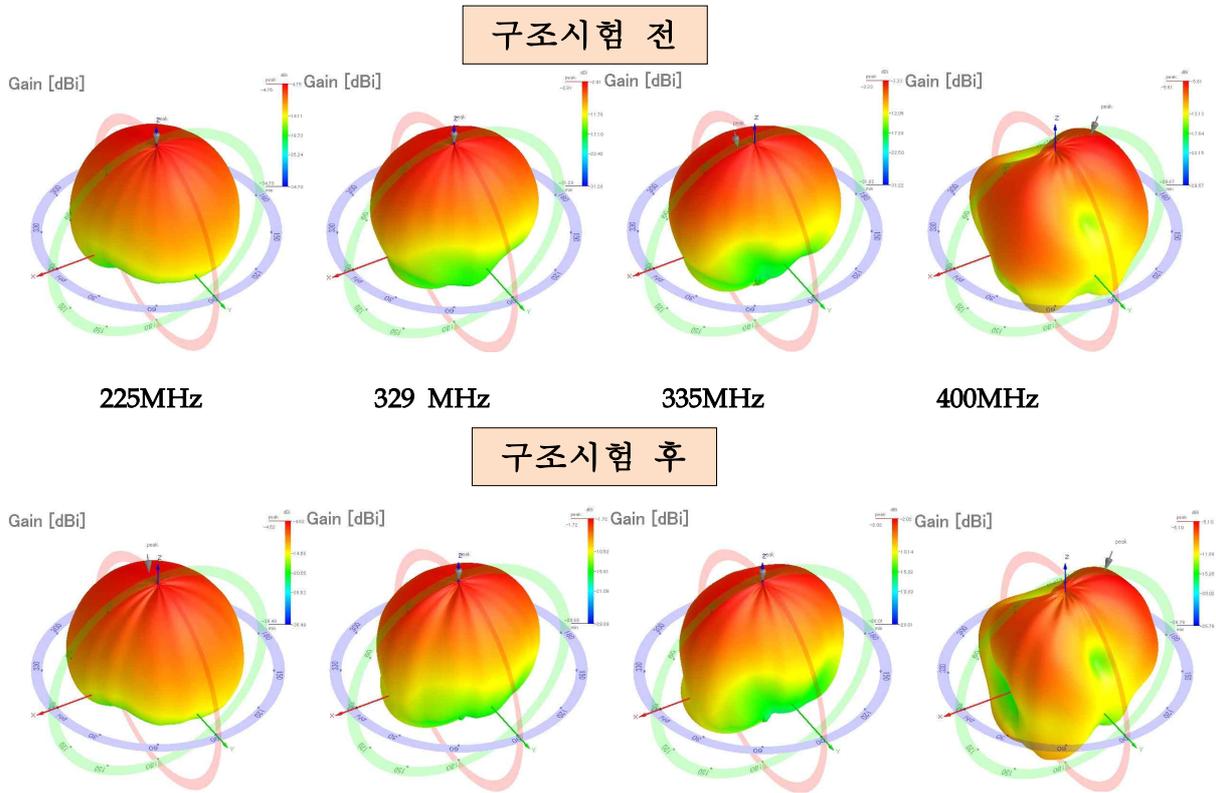


Fig. 10. Radiation Patterns

3.3 전단/피로/굽힘 하중시험

인장하중시험 후 전단하중시험과 피로하중시험을 실시하였다. 안테나시험도 역시 각 구조시험 후에 수행하였다. 이전 안테나 시험과 거의 같은 값을 보이므로 그래프는 생략하였다. 구조 변형안테나 시험을 수행하기 전 치구에 걸리는 하중을 확인하기 위하여 굽힘하중시험을 수행하였다. 최대 변위를 부가할 때에도 하중은 300 kgf 이내라는 것을 확인하고 치구를 설계 제작하였다.

3.4 구조변형안테나 시험

안테나 내장구조는 안테나이자 동시에 구조이므로 하중을 지지하고 하중에 의한 변형을 일으키므로 변형 발생 시 안테나의 성능을 확인하여야 한다. 변형을 발생시켜 안테나 성능을 측정하여야 하지만 실내 무반향챔버 내에서는 반사파 흡수 벽 사이에 하중부가 치구를 설치할 공간이 없고 하중부가치구는 안테나 성능에 영향을 미치지 않는 플라스틱 재질로 구성되어야 한다. Fig. 11과 같이 야외에 플라스틱 치구를 설치하여 안테나에 하중을 부가하고 반대편에 소스 안테나를 설치하여 신호를 주었다. 기준 소스 안테나에서 신호를 발신하고 Network Analyzer에서 안테나

내장 구조로부터 수신되는 신호의 크기를 측정하였다. 안테나 변형에 따라 수신되는 신호의 크기를 비교하므로써 변형에 따른 안테나 영향을 평가하였다. 이득, 방사패턴, 전압정재파비 등의 변수는 외부환경 영향이 포함될 수 있어 무의미하므로 수신되는 신호 수준만을 Fig. 12와 같이 비교하였다.

변형 없는 상태에서 최대 한 변 길이의 7%까지 8단계로 면의 방향으로 변위를 부가하면서 안테나의 신호 수준을 측정하였다.

Figure 12에서 수신되는 신호의 크기가 변형에 따라 거의 차이가 없음에 따라 안테나가 변형의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있었다.

3.5 충격하중 시험

인장하중, 전단하중 시험은 안테나 내장 구조재료의 탄성영역 범위 내에서 수행된다. 충격하중시험은 안테나 내장 구조의 표면에 충격하중을 부가하면서 영구변형이 발생하므로 2번째 시험편으로 시험을 수행하였다.

Figure 13은 충격하중 부가위치이다. 5.42 J, 8.14 J 을 각 2회씩 시험할 수 있도록 4개의 위치를 선정하였다.

Figure 14와 같은 치구를 사용하여 충격하중

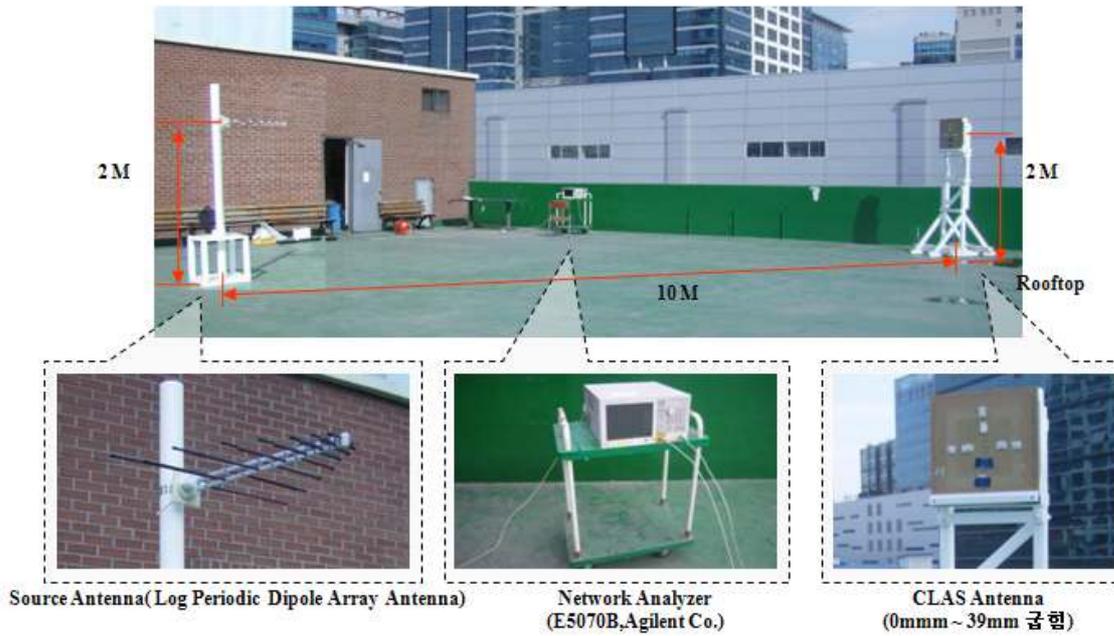


Fig. 11. Antenna Test under Structural Deformation

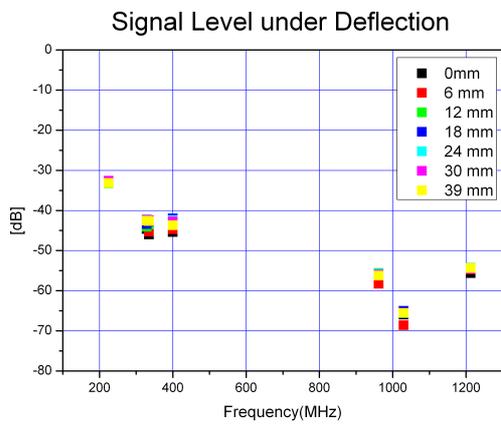


Fig. 12. Signal Level under Deflection



Fig. 14. Impact Load Test

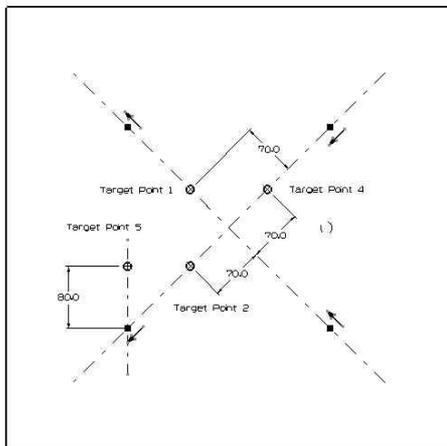


Fig. 13. Impact Test Locations

부가 후 2차 충격이 가해지지 않도록 하였다. Fig. 15는 충격 후 안테나 내장 구조 표면에 부착된 스트레인 센서의 측정 결과이다. Fig. 15의 6개 Strain 센서의 값 크기는 중요하지 않지만 시간에 따라 동일한 경향으로 크기가 작아짐에서 알 수 있듯이 충격하중이 1회만 정확하게 부가되고 시간에 따라 소멸됨을 알 수 있었다.

5.42 J 충격하중 부가 후 육안검사로 확인한

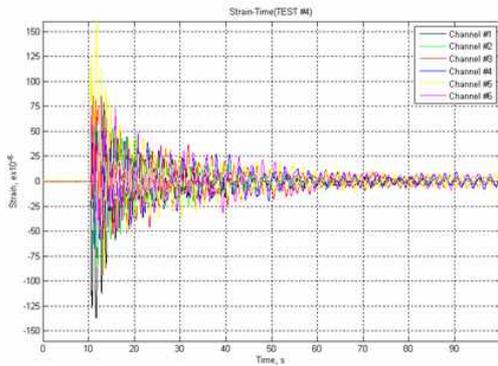


Fig. 15. Strain History after 8.14 J Impact

결과 수리가 필요한 손상은 발견되지 않았다. 8.14 J 충격하중 부가 후 수분침투가 발생할 정도의 손상이 발생하지 않았음을 확인하였다.

충격하중부가 시험 후 수행한 안테나 시험에서도 시험전과 비교하여 이득, 전압정재파비, 방사패턴의 성능 변화가 없음을 확인하였다.

3.6 시험평가 결과 및 분석

새로이 개발한 CLAS 시제품의 구조 요구조건과 안테나 요구조건의 만족도를 시험평가하기 위하여 Fig. 3의 시험평가 절차에 따라 모든 시험을 수행하고 그 결과를 획득하였다. 인장시험수행 전/후 안테나 전압정재파비 값에 차이가 발생하여 인장시험이 안테나 성능에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이후 전단/굽힘/피로 하중시험을 수행하고 안테나 성능시험을 수행하였으나 전단시험 전의 안테나 성능 값과 차이가 발생하지 않았다.

구조변형 시 안테나 성능시험을 옥외에서 수행하였다. 정사각형 모양의 CLAS 한쪽 면을 고정하고 면의 방향으로 한 면 길이의 7% 정도까지 변위를 부가하여도 안테나 신호수준이 변하지 않아 CLAS가 변형에 무관하게 안테나 성능을 발휘함을 확인하였다.

충격하중시험은 영구변형이 생기므로 2번째 시편으로 시험을 수행하였다. 충격하중 부가 후 시편에 대한 육안검사를 실시하였다. 영구 손상이나 수분침투가 없어 요구조건을 만족하였다. 이후 수행한 안테나 성능시험 결과와 충격시험 전 결과를 비교한 결과 차이가 거의 없어 충격하중은 안테나에 영향을 거의 주지 않음을 확인하였다.

3.6.1 원인분석

인장시험 전/후 안테나 시험결과를 비교한 결과 성능저하로 인정할 정도의 차이가 발생하는

것에 대한 원인을 분석하였다.

CLAS 시제품에 대한 X-ray 검사를 수행하였으나 어떤 손상도 발견되지 않았다.

Figure 1의 RF 케이블에 대한 원인분석을 하였다. RF 케이블은 유전체(외피), 외부도체, 중심도체(절연체, 내부도체) 로 구성되어 있다. 특성 임피던스는 $50 \pm 2 \Omega$, 커패시턴스는 Max. 32pF/ft이다. RF 케이블에 대한 손상을 인위적으로 발생시키고 손상 정도에 따라 ①정상, ②유전체 손상, ③유전체/외부도체 손상, ④유전체/외부도체/중심도체 손상의 4단계로 구분하였다. RF 케이블이 손상됨에 따라 식 2로 표현되는 RF 케이블 고유의 특성 임피던스가 변화되며 이로 인해 정재파비 특성이 변화하였다.

$$Z_o = \frac{138.1}{\sqrt{\epsilon}} \times \log \frac{D}{d} \quad (2)$$

(ϵ : 유전율, D: 외부도체 내경, d:내부도체 외경)

$$\Gamma = \frac{Z_L + Z_o}{Z_L - Z_o} \quad (3)$$

(Γ : 반사계수, Z_L : 부하 임피던스)

$$Z_o = \sqrt{-\frac{L}{C}} \quad (4)$$

(L: 단위길이당 인덕턴스, C: 단위길이당 커패시턴스)

물리적인 크기가 신호의 파장에 비하여 클 경우 선로의 위치에 따라 전압이나 전류가 일정하지 않고 위상에 따라 다른값을 나타내므로 전송선로 등가모델을 적용하면 식 2의 특성 임피던스는 식 4와 같이 표현할 수 있고 Fig 16, 17과 같이 RF 케이블의 전송선로 등가회로로 표현할 수 있다.

Figure 17에서와 같이 RF 케이블 손상으로 인해 전송선로 등가회로에서 C(커패시턴스) 성분이

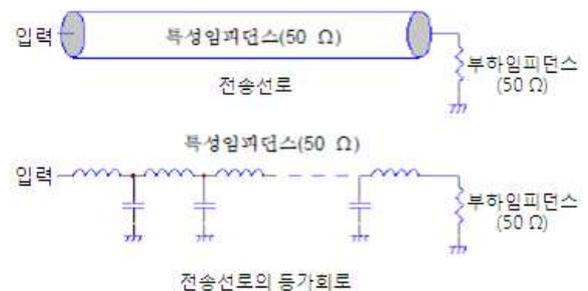


Fig. 16. Transmission Line Circuit of Normal RF Cable

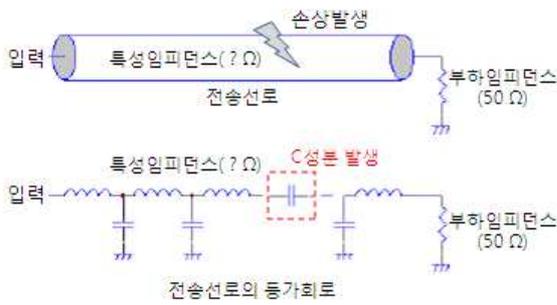


Fig. 17. Transmission Line Circuit of Damaged RF Cable

생성되며, 이것은 주파수에 따라 신호의 임피던스 성분에 영향을 준다.

3.6.2 RF 케이블 손상시험

RF 케이블 손상이 안테나 내장 스킨구조의 인장시험 전/후 전압정재파비 값의 차이로 추정됨에 따라 RF 케이블에 임의로 손상을 단계별로 주고 전압정재파비 측정 시험을 수행하였다. 손상의 단계를 총 4개로 구분하여 정상, 유전체 손상, 유전체/외부도체 손상, 중심도체 손상된 RF 케이블을 준비하여 시험을 수행하였다. 시험 결과를 Fig. 18에 0.225~0.4GHz의 낮은 주파수 대역, Fig. 19에 0.962~1.21GHz의 높은 대역으로 구분하여 정리하였다.

Figure 18, Fig. 19의 결과에서와 같이 RF 케

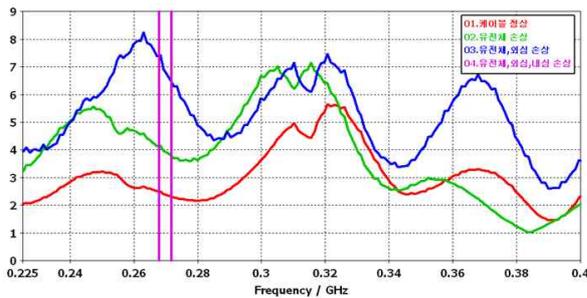


Fig. 18. VSWR for Low Frequency band

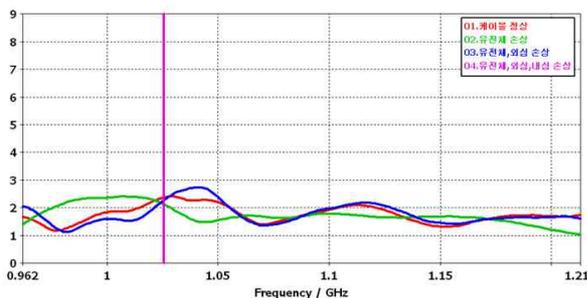


Fig. 19. VSWR for High Frequency band

이블의 손상은 중심도체가 손상되기 전까지는 낮은 대역의 전압정재파비 성능을 저하하는 영향을 주고 높은 대역의 전압정재파비에는 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 이것은 Fig. 9의 인장시험 전/후 전압정재파비 시험결과와 유사한 경향을 보인다.

RF 케이블 손상 전/후의 전기적인 성능시험 결과 ②유전체 손상 < ③유전체/외부도체 손상 < ④중심도체 손상 순으로 성능저하가 심하였다.

따라서 케이블의 손상방지를 위한 안테나 설계 개선이 필요한 것으로 분석하였다.

IV. 결론

새로운 다중대역 안테나 내장 스킨구조를 개발하고 구조강도와 안테나 성능을 입증하기 위한 시험평가 절차를 소개하였다. 인장강도, 전단강도, 굽힘강도, 피로강도와 충격강도를 2개의 시편으로 입증하고 각 구조강도 시험 후 안테나 시험을 수행하여 각 구조강도시험이 안테나에 미치는 영향을 입증하였다. 시험결과 인장강도 시험 후 전압정재파비 값이 인장강도 시험전과 인지할 만한 차이가 발생하여 안테나에 영향을 미쳤음을 확인하였다. 원인분석 결과 RF케이블의 손상방지를 위한 안테나 설계 개선이 필요한 것을 확인하였다.

다른 구조강도 시험은 전압정재파비, 이득, 방사패턴 모두 구조강도시험 전과 후의 값이 차이가 없었으므로 안테나에 영향을 미치지 않았음을 확인하였다.

모든 구조강도시험을 수행한 후 안테나일체구조가 변형된 상태에서 안테나 성능시험을 수행하여 구조변형이 안테나 성능에 미치는 영향을 시험으로 입증하였다. 0.15 GHz ~ 2.0GHz 주파수 대역을 사용하고 있는 본 연구의 안테나는 전체 길이의 7% 면의 방향 하중을 부가하여도 안테나 성능을 유지하여 구조변형이 안테나에 미치는 영향은 무시할 만한 수준인 것을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 시험평가 절차대로 새로이 개발된 다중대역 안테나 내장 스킨구조의 구조강도 및 안테나 성능을 입증하였다. 인장시험 전/후 수행한 안테나 시험결과를 비교하고 설계 개선이 필요한 점을 발견하였다. 설계개선한 안테나는 제작 후 항공기에 장착하여 비행테모시험을 수행하였으며 후속 논문에 게재할 예정이다.

References

1) Kudva, Y. N. and Lockyer A. J.,

"Exploiting Smart Structures Technologies for Military Aircraft Applications-Perspectives on Development of a Smart Air Vehicle," AIAA SDM Conference, 12-15 April, 1999

2) Kim, Y. S., Kim, M. S., Park C. Y., and Tae H. S., "Design of Compact Wideband CLAS for Aircraft Communication," ASHMCS 2012, vol. 1, p48, Aug. 29~31, 2012

3) Kim, M. S., Park, C. Y. and Jun, S. M., "Design and Experimental Validation of a Conformal Load-bearing Antenna Structure", ASHMCS 2012, vol. 1, p49, Aug. 29~31, 2012.

4) Kim, J., Jang, J. Y., Ryu, G. H., Choi, J. H. and Kim, M. S., " Structural Design of Korea Aero-vehicle Smart Skin Antenna (KASSA)", ASHMCS 2012, vol. 1, p50, Aug. 29~31, 2012.

5) Lockyer, A. J., Alt, K. H., Coughlin, D. P., Durham, M. E., Kudva, J. N., " Design and Development of a Conformal Load-bearing Smart-skin Antenna: Overview of the AFRL Smart Skin Structures Technology

Demonstration (S³RD)," SPIE Smart Structures and Materials, Vol 3674, "Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies," Newport Beach, CA, Mar. 1-4, 1999.

6) Schippers, H., Creemers, R. J. C. , Bron, E., Hulzinga, A., Bekers, D. J., Van der Houwen, E. H., Gerini, G., " Integration of Antennas into Composite Load-bearing Aircraft Structures", NATO OTAN. RTO-AVT-141,

7) Lockyer, A. J., Alt, K. H., Kudva, J. N. and Tuss., J, " Air Vehicle Integration Issues and Considerations for CLAS Successful Implementation", Proceedings of SPIE, Vol. 4332, Jun. 2001

8) Kim, D. S., Kim, J. Y., Kim, J. H., Kim, M. S., Jun, O. C., Park, W. S., and Hwang, W. B., " Design and Fabrication of a Composite-antenna-structure for Broadband Frequency with Microwave Absorber", Journal of Composite Materials, Vol 46, Jul. 2012, pp. 1851~1858