

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(10), 820-826(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.10.820>

복합자성유전체를 이용한 항공기 CLAS 안테나 개발

김요식*, 배기형*, 유병길*, 김민성**, 박찬익**

An Aircraft CLAS Antenna Design using Composite Magneto-dielectric Material

Yo-Sik Kim*, Ki-Hyoung Bae*, Byung-Gil Yu*, Min-Sung Kim** and Chan-Yik Park**
Samsung Thales*, Agency for Defense Development**

ABSTRACT

In this paper, a compact and wideband CLAS(Conformal Load bearing Antenna Structure) was studied using smart skin technique. In order to satisfy the electrical performance of the CLAS antenna, the proposed CLAS antenna is composed of conductive mesh, face-sheet, radiator, honeycomb, housing. Especially, radiator is composed of composite magneto-dielectric material and radiating element etched on the PCB (Printed Circuit Board). The radiating element is inserted into the composite magneto-dielectric material and has slotted Folded LP(Log Periodic) structure. By fabricated composite magneto-dielectric, the resonance frequency is decreased and the impedance matching characteristics is improved. We verified that the antenna has wideband characteristics and compact size using the antenna test results.

초 록

본 논문에서는 스마트 스킨 기술을 활용한 소형경량 및 광대역 특성을 갖는 항공기용 안테나 내장 스킨 구조(CLAS: Conformal Load bearing Antenna Structure)를 설계하였다. 제안된 CLAS 안테나는 전기적 성능을 만족하기 위해 전도성 매쉬, 외부표피, 복사소자, 내부심재 및 하우징 등으로 구성하였다. 특히, 복사소자의 경우 복합자성유전체와 PCB에 에칭된 방사체로 구성되어 있으며 방사체는 복합자성유전체에 삽입되어 슬롯형 폴디드 대수주기 구조(Folded Log-Periodic)를 갖는다. 제안된 CLAS 안테나는 복합자성유전체에 의해 공진주파수가 낮아지고 임피던스 매칭특성이 향상되었으며 측정 결과, 안테나의 소형경량 및 광대역 특성을 확인하였다.

Key Words : CLAS(안테나 내장 스킨 구조), Composite magneto-dielectric material(복합자성유전체), Folded LP antenna(폴디드 대수주기 안테나), Wideband(광대역)

1. 서 론

항공기(전투기, 민항기, 무인기 등) 통신 시스템의 발전에 따라 다양한 안테나가 개발되었으

며, 항공기의 목적과 그 역할에 따라 수 MHz에서 수십 GHz에 이르기 까지 다양한 주파수대역에서 사용할 수 있는 안테나의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 전투기의 경우 항공운항 정보를

† Received: August 20, 2013 Accepted: September 30, 2013

* Corresponding author, E-mail : axlyosick@naver.com

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

위한 통신용 안테나를 포함해 감시, 정찰 및 정보수집에 필요한 다수의 안테나 탑재로 인해 전투생존성에 많은 제약을 받고 있다. 뿐만 아니라 기존의 항공기에 탑재된 안테나의 경우 항공기 표면에 외부돌출형으로 장착되어 항공기의 성능 저하(항력 증가 및 레이더 반사 면적(RCS, Radar Cross Section) 증가)의 원인이 되었다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 수년전부터 미국과 유럽의 해외 선진사를 중심으로 안테나 자체로 전기적인 기능을 하고, 하중지지 구조 역할을 동시에 수행할 수 있는 CLAS 안테나 구조 설계 및 제작에 관한 기술이 활발히 연구되고 있다[1].

CLAS 안테나는 서로 다른 기계적/전기적 특성을 가지는 플랫폼의 다양한 형태에 따라 설계 및 제작되며 크게 캐비티 백 슬롯형 스파이럴(Cavity-back slot-spiral) 안테나, 슬롯형 배열(slot-array) 안테나 및 마이크로스트립(Microstrip) 안테나 등 3가지 형태로 나뉜다. 이중 마이크로스트립 안테나를 적용한 CLAS 안테나는 기존의 안테나 요소와 하중지지 구조물의 적합성을 향상시키는 방법 중 하나로 현재까지 CLAS 안테나에 대한 가장 적합한 개념으로 알려져 있다[2].

본 논문에서는 마이크로스트립 안테나의 일종으로 슬롯 형상의 폴디드 대수주기 구조를 갖는 방사체(PCB 기판)와 복합자성유전체의 결합으로 구성된 CLAS 안테나를 개발하였다. 전도성 매쉬, 외부표피, 복사소자, 내부심재 등이 샌드위치 구조로 접합된 CLAS 안테나는 기존 CLAS 안테나에 비해 소형경량 및 광대역 특성을 제공한다.

Table 1은 제안된 CLAS 안테나의 개발 요구 사양으로 KT-1 항공기에 장착하여 비행테모용으로 사용되며 UHF(AM), ILS Glide Slope, TACAN, IFF 4개의 주파수 대역을 만족하도록 설계된다.

Table 1. CLAS Specification(electronics)

항목	요구사항
주파수 [MHz]	UHF(AM)
	ILS Glide Slope
	TACAN
	IFF
이득 [dBi]	-7 dBi 이상
정재파비 (VSWR)	3.5 : 1 이하
크기 [mm]	570×570×45 (Speed Brake 대체 가능형상)

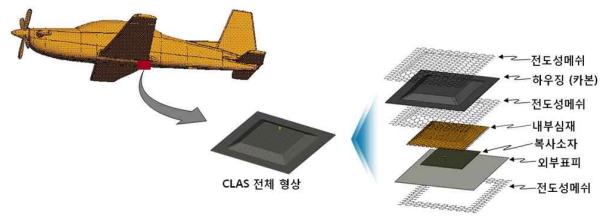


Fig. 1. CLAS Structure

II. 본 론

2.1 안테나 구조

KT-1 항공기 내 speed brake 탈거 후 해당 위치에 제안된 CLAS 안테나가 장착됨에 따라 공간적 제약을 최소화하는 동시에 안테나의 전기적 성능을 만족하도록 Fig. 1과 같이 전도성 매쉬, 외부표피, 복사소자, 내부심재 및 카본하우징(앞, 뒷면 전도성 매쉬 도포) 등의 샌드위치 구조로 설계된다.

전도성 매쉬의 경우 낙뢰로부터 안테나 시스템을 보호하는 역할을 수행하며, 외부표피는 외부환경에 노출된 항공기의 표면에 위치하여 안테나의 방사량을 유지시켜주는 레이돔 역할 및 외부형상(OML, Outer Mold Line)과 공기역학적 하중 지지를 동시에 수행한다. 복사소자는 방사체(PCB 기판)와 복합자성유전체의 결합으로 구성되며 안테나 방사체 역할을 수행한다. 내부심재(Honeycomb)는 카본하우징과 복사소자 사이에 위치하여 복사소자가 최적의 안테나 방사효율을 일정하게 유지할 수 있도록 물리적인 공간을 유지하는 동시에 항공기로부터 전달된 진동이나 충격으로부터 복사소자를 보호하는 역할을 수행한다. 카본하우징은 일반적으로 안테나의 반사판으로 동작하며 안테나의 방사 성분이 항공기 내부의 전자장비 시스템에 손상을 미치지 않도록 보호하는 역할을 수행한다[3].

2.2 안테나 형상 설계

제안된 CLAS 안테나는 Fig. 1의 CLAS 안테나 구성도를 바탕으로 형상 설계를 진행하였으며 M&S를 통하여 안테나의 전기적 특성을 최적화하였다. Fig. 2는 CLAS 안테나 모델링 형상으로 M&S 해석 시, 실제 제품과 유사하게 각 구성품들의 제원(재질, 크기, 전기적 물성치 등)을 반영하였으며(단, 내부심재 및 외부표피는 M&S 해석에서 제외, 카본하우징의 경우 도체(PEC) 재질로 해석), Table 1의 CLAS 안테나 개발 사양을 만족하도록 설계하였다.

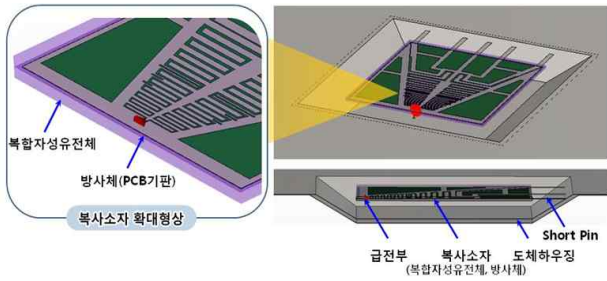


Fig. 2. CLAS Modeling

CLAS 안테나 설계 시 가장 중요한 부분은 복사소자 설계이다. Table 1의 CLAS 안테나 개발 요구사항에서 전체 CLAS 안테나 크기는 570×570×45mm 이지만 접지면을 제외한 복사소자의 제작 공간은 300 × 300 × 6mm 으로 제한되어 있다. 이와 같은 공간적인 제약으로 인해 일반적인 CLAS 안테나 적용 시 UHF(AM) 대역을 만족하는 안테나를 설계하기란 매우 어렵다. 이러한 제약사항과 높은 전기적 사양을 만족하기 위해서는 복사소자의 성능을 획기적으로 개선해야 한다.

본 논문에서는 안테나 개발 요구사항을 만족 하면서 소형경량 및 광대역 특성을 갖는 CLAS 안테나를 개발하기 위해 Fig. 2와 같이 복합자성 유전체 내에 방사체(PCB 기판)가 삽입된 일체형 복사소자를 제안하였으며, 복사소자의 설계방안은 Fig. 3 ~ Fig. 7과 같다.

2.2.1 방사체(안테나 패턴) 설계

먼저 복사소자를 구성하는 요소 중 하나인 방사체의 경우 CLAS 안테나가 광대역에서 동작하도록 슬롯 형상의 폴디드 대수주기 구조를 제안하였다. Fig. 3과 같이 기본 대수주기 구조의 경우 다중슬롯에 의한 다중공진 생성으로 광대역특성을 나타내며 대수주기의 비율에 따라 안테나의

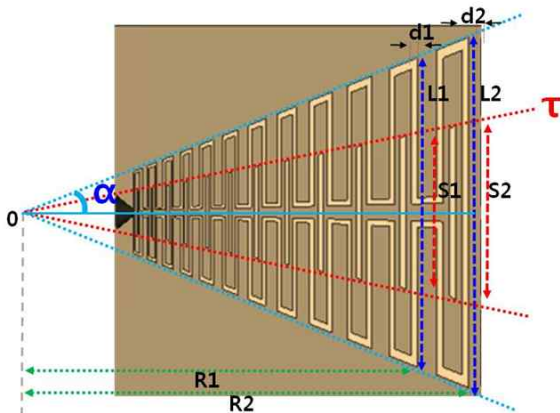


Fig. 3. Basic radiating element design

크기 및 주파수가 결정되는 특성을 가진다.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{L2}{L1} = \frac{R2}{R1} = \frac{d2}{d1} = \frac{S2}{S1} \tag{1}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{1 - \tau}{4\sigma} \right], \quad \sigma = \frac{R2 - R1}{2 \times L2} \tag{2}$$

설계 변수는 식 (1), (2)와 같이 α(각도), τ(크기비), N(소자수)이며 주요 변수들의 설계 값에 따라 안테나의 성능이 변화된다.[4-8]. 제안된 CLAS 안테나의 경우 α(각도)는 30° ~ 45°, τ(크기비)는 0.8 ~ 0.9, N(소자수)는 9 ~ 13개를 기준으로 설계하였으며 유전율이 3.38인 Rogers R4003C 기판을 사용하였다.

제안된 CLAS 안테나의 방사체는 Fig 4와 같이 폴디드 대수주기 구조를 변형한 형태로 설계하였다. 급전부를 따라 인가된 신호는 연속되는 전송선로(transmission line)와 슬롯라인(slot line)의 길이 비와 간격 비 조절을 통해 폴디드 대수주기 구조의 광대역특성을 유지하도록 하였으며 구리(도체)면 일부분을 제거하여 그라운드슬롯으로 동작하도록 설계하였다. 이로 인해 용량성 부

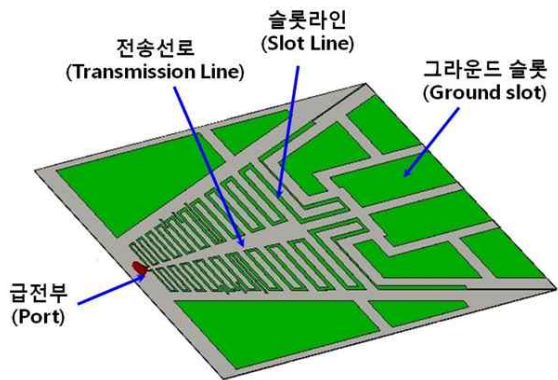


Fig. 4. Proposed radiating element design

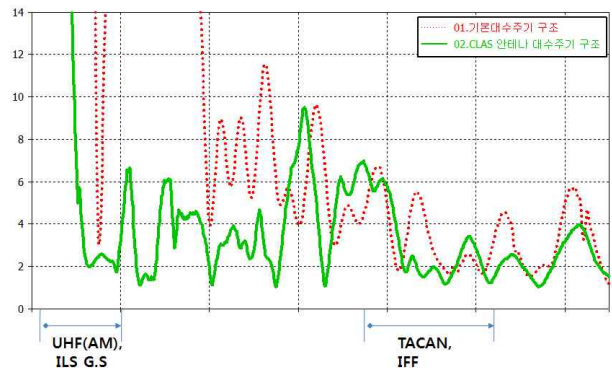


Fig. 5. VSWR(basic LP/ proposed CLAS LP structure)(simulation result)

하(capacitive loading)에 의한 위상 변이(phase shift)를 조절함으로써 앞선 기본 대수주기 구조에 비해 보다 낮은 주파수 대역에서 안테나로 동작하도록 하였다.

기본 대수주기 안테나와 변경된 대수주기를 적용한 CLAS 안테나의 M&S 수행한 결과는 Fig. 5와 같다.(CST_MWS(Microwave studio) 시뮬레이션 툴 사용.) 제안된 CLAS 안테나 대수주기 구조의 경우 기본 대수주기 구조에 비해 낮은 주파수 대역에서 공진주파수가 형성되어 안테나로 동작함을 알 수 있다.

2.2.2 복합자성유전체 설계

제안된 CLAS 안테나 방사체 설계와 더불어 낮은 주파수 대역에서 안정적인 전기적 특성을 유지 할 수 있는 안테나 설계를 위해 복합자성유전체를 적용하였다.

일반적으로 복합자성유전체는 유기물(도체성분)에 자성물질(Ferrite powder)을 혼합하여 사출된 혼합구성물으로써, 안테나의 전기적 특성을 변화시키는 가장 중요한 요인이다[9]. 복합자성유전체에 의한 안테나 소형화 원리는 아래와 같다.

유전체 매질 내에서의 관내파장 λ_g 은 자유공간에서의 파장 λ_0 과 식 (3)의 관계를 갖는다.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\eta} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{f_n} \tag{3}$$

여기서 η 은 굴절율(refractive index)로써 $\eta = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ (ϵ_r : 비유전율, μ_r : 비투자율) 이다.

식(3)으로부터 유전체 매질내에서의 관내파장 λ_g 은 유전체 매질의 비유전율 ϵ_r 과 비투자율 μ_r 에 의해 결정되는 굴절율의 영향으로 자유공간에서의 파장 λ_0 보다 짧아지게 된다. 따라서 비유전율 또는 비투자율을 높임으로써 안테나의 크기를 소형화 할 수 있게 된다.

일반적으로 안테나 소형화를 위해 높은 비유전율 ϵ_r 을 갖는 유전체 기판을 이용하는데 이 경우 안테나의 대역폭이 좁아지는 문제점이 발생한다. 이와 반대로 비투자율 μ_r 를 증가시킬 경우 안테나의 대역폭 변화에 큰 영향을 주지 않으나 유전체의 손실증가로 안테나의 방사효율이 감소하는 문제점이 발생한다.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta) \tag{4}$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' = \mu'(1 - j \tan \delta')$$

$$\eta = \eta_0 \sqrt{\epsilon_r / \mu_r} \tag{5}$$

위 식은 비유전율(ϵ_r)과 비투자율(μ_r)의 관계식으로 여기서 $\tan \delta$ 와 $\tan \delta'$ 은 유전체 손실 탄젠트와 자성체 손실 탄젠트이다. 이러한 손실 탄젠트가 높아질수록 안테나 방사효율의 감소와 임피던스 매칭에 문제점이 발생한다. 복합자성유전체의 경우 도체성분과 페라이트 성분으로 구성되어 유전체의 투자율을 쉽게 조절할 수 있다. 이에 반해 도체성분과 자성물질로 인해 자성체 손실이 크다.

유전체 매질을 이용한 일반적인 마이크로스트립 안테나의 공진주파수는 식 (3)으로부터 자유공간에서의 파장 λ_0 대신에 관내파장 λ_g 에 의해 결정된다. Fig. 6와 같이 일반적인 유전체에 비해 복합자성유전체를 이용하였을 경우 비유전율(ϵ_r)과 비투자율(μ_r)의 비율이 1이 되면 식 (5)와 같이 기관의 고유 임피던스와 자유공간 임피던스가 같아지기 때문에 표면파가 거의 사라지고 결과적으로 안테나의 효율이 증가하게 된다. 따라서 복합자성유전체를 사용하여 유전율과 투자율을 적절하게 조절하게 되면 안테나의 소형화 및 광대역화를 이룰 수 있다.

복합자성유전체가 안테나의 전기적 특성에 미치는 효과를 검증하기 위하여 다음과 같이 복합자성유전체 유.무에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다.

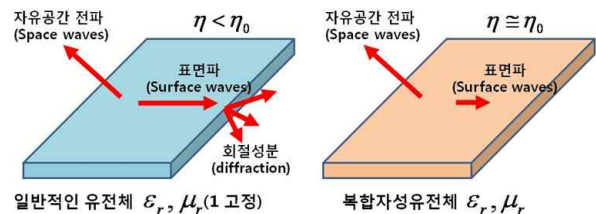


Fig. 6. Comparison substrates of ordinary and magneto dielectric

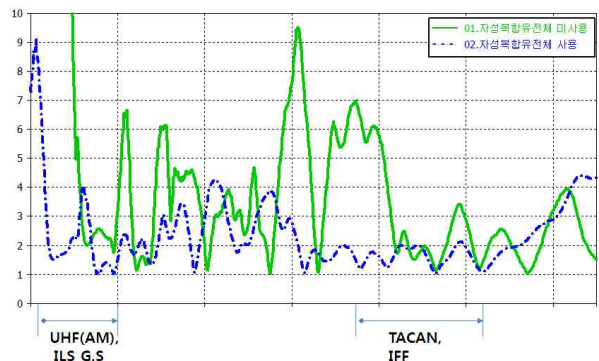


Fig. 7. VSWR(with/without Magneto-dielectric material) (simulation results)

복합자성유전체 사용 시 안테나의 정재파비 (VSWR) 특성이 사용하지 않은 경우에 비해 동작 주파수대역(UHF(AM), ILS Glide Slope, TACAN, IFF)에서 개선됨을 확인하였다.

이는 투자율 특성을 갖는 복합자성유전체로 인해 방사체 슬롯 소자의 대역폭이 확장되어 주파수간의 합성이 원활하게 이루어지기 때문이다. 또한 약 100MHz 이상의 공진 주파수를 하향시켜(정재파비 3.5 : 1 기준) 광대역 특성을 가진다.

2.3 안테나 제작 및 측정

앞선 M&S 결과를 바탕으로 방사체 설계를 최적화 하였으며 Fig. 8과 같이 생성된 복합자성유전체에 방사체를 삽입한 상태에서 삽입사출 방식으로 제작하였다. 복합자성유전체의 경우 LUPOX LW5303와 자성물질을 첨가하여 생성되며, 이때 방사체에 급전을 위한 케이블 부분은 도피시켜 삽입 사출 후 케이블이 연결 가능하도록 설계하였다.

복사소자는 요구사양을 만족하도록 300 × 300 × 6 mm로 설계하였으며, 방사체의 크기는 삽입사출 방식을 적용함에 따라 복사소자보다 작은 290 × 290 × 0.4 mm 로 설계하였다.

제작된 복사소자를 포함하여 Fig. 9의 절차에 따라 전도성 매쉬, 외부표피, 카본하우징(앞.뒤면 전도성 매쉬 도포), 복사소자, 방사체, 내부심재, 커넥터 및 케이블, 쇼핀 등을 제작하였으며 완성된 CLAS 안테나는 Fig. 10과 같다.

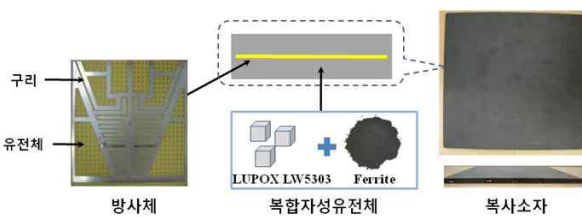


Fig. 8. Compose of Magneto-dielectric material

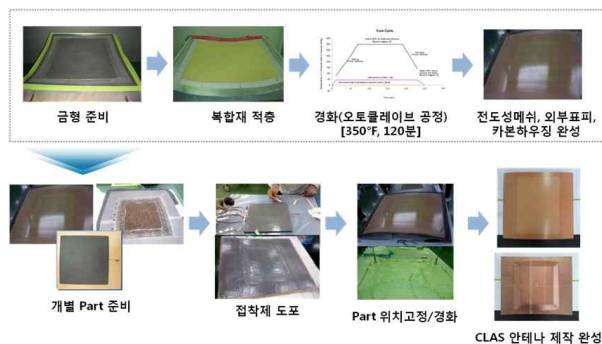


Fig. 9. Manufacture process of CLAS

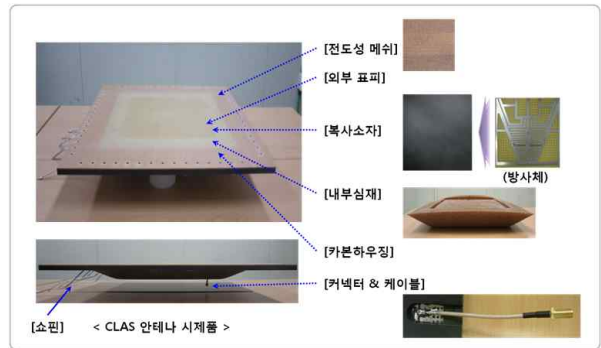


Fig. 10. Fabricated CLAS

KT-1 항공기 내 speed brake가 하단면에 장착됨에 따라 제안된 CLAS 안테나는 지상(수직)면을 지향하며 중심점을 기준으로 하향 방사한다 아울러 제작된 CLAS 안테나의 전기적 성능 검증을 위해 정재파비, 이득, 방사패턴 등을 수행하였으며 그 결과는 아래와 같다.

정재파비 측정결과, 시뮬레이션 해석 결과(Fig. 7 참조)와 유사한 특성을 갖으며 Fig. 11와 같이 동작 주파수 전대역(UHF(AM), ILS Glide Slope, TACAN 및 IFF)에서 정재파비 요구사항(3.5 : 1 이하)을 만족함을 확인하였다. 이는 복합자성유전체 특성에 의한 것으로 실제 UHF(AM) 안테나 제작 시 공진 주파수 하향에 따라 기존 안테나 크기 대비 약 50% 이상 크기 및 무게를 감소하여 설계할 수 있음을 의미한다.

이득 측정결과 Fig. 12과 같이 동작 주파수 전대역에서 (-5.70 ~ -3.36dBi, 0.31 ~ 1.32 dBi) 이득 요구사항을(-7dBi 이상) 만족하였다. 그러나 방사패턴의 경우 Fig. 13과 같이 일부 대역에서

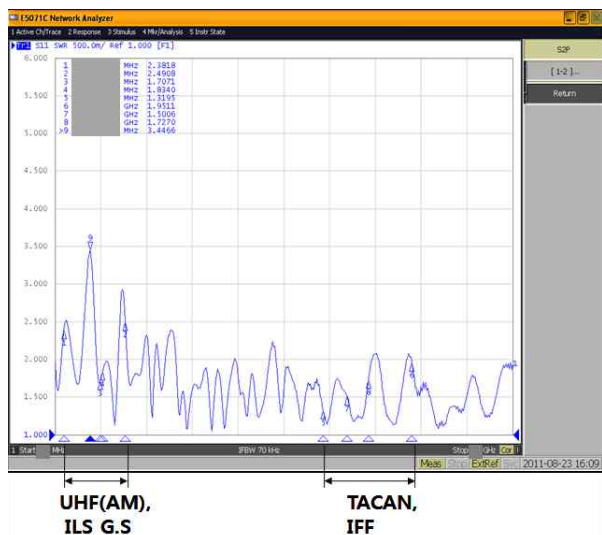


Fig. 11. VSWR (with Magneto-dielectric material) (measured results)

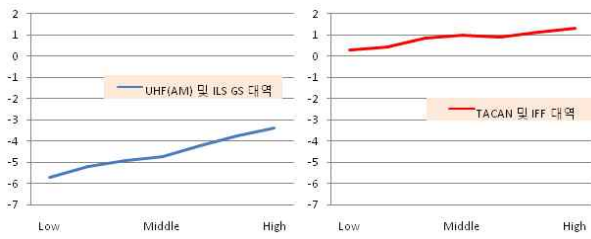


Fig. 12. Gain(measured results) of CLAS

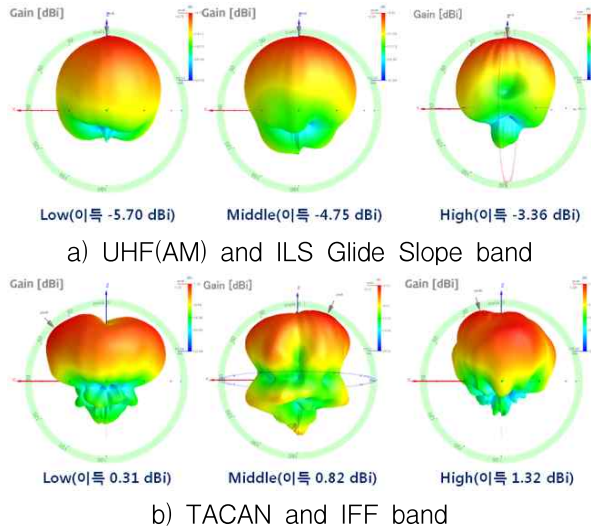





Fig. 13. Radiation pattern(measured results) of CLAS

Table 2. Comparison of Specification (electronics)

구분	CLAS 안테나	해외 선진사 Conformal 안테나	
		AEM-SAS18 31	AEM-SAC0 621
주파수 [MHz]	UHF (AM) ILS Glide Slope TACAN IFF	100 ~ 3,000	250 ~ 3,000
이득 [dBi]	-5.7 ~ 1.32 dBi (선형편파)	-15 ~ 3 dBic (원형편파)	
크기 [mm]	570×570×45 (Speed Brake 형상설계, 복사소자: 300×300×6)	457×457×7.6	Ø 675×359
정재파비 (VSWR)	3.5 : 1 이하	3 : 1 이하	
형상			

방사패턴 일그러짐 현상이 발생되었다. 이는 대수주기 안테나의 특성상 주파수가 증가함에 따라 고주파 대역에서 전류분포가 변화되어 발생하는 현상으로, 향후 안테나의 전기적 특성 안정화를 위해 보완되어야 할 사항이다.

끝으로 제안된 CLAS 안테나의 성능 비교를 위해 Table 2와 같이 해외 선진사 Conformal 안테나와 성능 비교를 수행하였다.

크기나 무게의 경우 항공기 장착위치 및 동체접지 역할 수행 정도에 따라 상이한 조건으로 직접적인 비교는 불가하나(해외 제품의 경우 장착 및 접지를 위한 크기 재산정 필요) 안테나의 방사면적만을 고려시 해외 선진사 Conformal 안테나 대비(457×457) 제안된 CLAS 안테나의 방사면적(300×300)이 적음을 알 수 있다. 따라서 동일한 항공기 장착조건을 가정 시 제안된 CLAS 안테나가 해외 선진사 Conformal 안테나 대비 소형화됨을 알 수 있다. 또한 안테나 이득의 경우, 동일한 동작주파수를 기준으로(UHF(AM) Low Freq. 기준) 해외 선진사 Conformal 안테나 대비 약 10dB 이상 이득 특성 비교 우위를 확보하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 항공기에 장착 가능한 CLAS 안테나를 제안하였다,

전도성 매쉬, 외부표피, 복사소자, 내부심재 및 카본하우징 등이 샌드위치 구조로 접합된 형상설계를 통해 구조적 안정성을 향상 시켰으며 슬롯형 대수주기 구조의 방사체와(PCB 기판)와 복합자성유전체로 구성된 복사소자 설계를 통해 낮은 주파수 대역에서 안정적인 안테나 특성을 유지할 수 있도록 하였다. 이를 통해 소형경량 및 광대역 특성을 확보하였다.

제작된 CLAS 안테나의 전기적 특성(정재파비, 이득, 방사패턴) 측정 결과, 동작주파수 전 대역(UHF (AM), ILS Glide Slope, TACAN 및 IFF)에서 정재파비 및 이득 요구사항을 만족하였다.

제안된 CLAS 안테나는 항공기 장착 환경에 따라 다양한 형태로 개발이 가능하며, 향후 차세대 항공기에 적용될 안테나 개발 시 CLAS 안테나 시스템의 안정화 및 상용화를 앞당길 수 있을 것으로 사료된다.

References

1) Allen J. Locker et al. "Design and development of a conformal load-bearing smart

skin antenna: overview of the AFRL smart skin structures technology demonstration (S3TD)", industrial and commercial applications of smart structures technologies, SPIE Smart Structures and Materials, Vol.3674, pp.410-424, 1999

2) Paul J. Callus, Novel Concepts for Conformal load-bearing antenna structure, Australian Defence Force, 2008

3) L. Josefsson, P. Persson, Conformal Array Antenna Theory and Design 2ndEd,(IEEEpress: Wiley-interscience),2006

4) Constantine A. Balanis, *Antenna Theory*, 3th Ed., John Wiley and Sons, 2005.

5) J. W. Greiser, "A New Class of Log-

Periodic Antennas," *IEEE Proc.*,Vol. 52 (May 1964) : 617

6) R. H. DuHamel and F. R. Ore, "Logarithmically Periodic Antenna Design," *IRE Int.Conv.Rec.*,Vol.6(March1958):139- 151

7) D. E. Isbell,"Log-Periodic Dipole Arrays," *IRE TransPropagat.*,Vol.AP-8(May1960): 260-267

8) R. L. Carrel,"The Design of Log-Periodic Dipole Antennas,". *IRE Int. Conv. Rec.*, Vol. 9 (March 1961): 61-75

9) Mosallaei, H. "Magneto-Dielectrics in Electromagnetics: Concept and Applications" *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 52, no. 6, pp. 1558-1567, June 2004.