

배열 안테나용 AEM형 FSS 레이돔 설계

Design of AEM FSS-Radome for Array Antenna

김 상 근 · 이 기 태 · 서 일 성*

Sang-Keun Kim · Gi-Tae Lee · Il-Seong Seo*

요 약

본 논문에서는 단위-셀 EM 시뮬레이션 기법을 통해 주파수 선택적 전파투과막(FSS: Frequency Selective Surface)을 갖는 AEM(Advanced Enclosed Mast) 레이돔을 설계하고, 16×16 배열안테나 방사 패턴 시험을 통해 레이돔의 성능을 검증하였다. 측정된 결과, 평면파 입사 조건을 가정한 시뮬레이션 결과와 원전계 및 근전계 조건에 레이돔을 두고 시험한 결과가 서로 잘 일치하는 결과를 확인하였다. 이 결과들을 통해 검증된 AEM형 FSS 레이돔을 활용하여 기존 마스트 대비 안테나의 RCS를 줄이는 것이 가능할 것이다.

Abstract

In this paper, we present a design of AEM radome with frequency selective surface using unit-cell EM simulation method and verified the performance of AEM radome by the radiation pattern measurements of 16×16 array-antenna. Measured results under near-field condition showed a good agreement with the simulation and far-field measured ones. And there were no radiation pattern variation between antenna only and antenna with AEM radome. From these results, we verified that AEM radome with frequency selective surface can be a solution to reduce the RCS of conventional mast and radar.

Key words : Frequency Selective Surface(FSS), Antenna Radome, RCS, Transmission Loss, Radiation Pattern

I. 서 론

최근 RCS(Radar Cross Section)가 큰 레이더용 안테나의 스텔스 성능을 높이기 위한 방법의 하나로 주파수 선택적 투과막(Frequency Selective Surface: FSS)을 이용한 안테나 레이돔에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[1]. 특히 함정용으로는 AMRFC(Advanced Multi-function Radio Frequency Concept)가 적용되어 레이더와 전자전, 그리고 통신용 안테나들을 하나의 AEM(Advanced Enclosed Mast)형 Mast로 통합하려는 시도가 이루어지고 있다^[2]. 이러한 AEM형

레이돔에 FSS막을 적용할 경우, 모든 안테나에 대한 RCS가 줄어들어 전체 함정에 대한 RCS를 낮추는데 효과적이다. 그림 1에서와 같이 사용하는 주파수 대역에 대해서는 통과시키고, 사용하지 않는 대역은 입사된 방향과 다르게 반사시킴으로써 내부 안테나들의 RCS를 감쇄시킨다. 이 때, Mast에 사용되는 FSS 레이돔의 경우 기계적 강도가 강하면서 가볍고 전체 RF 시스템 성능을 저하시키지 않도록 전파투과 손실이 작고 안테나 패턴에 영향을 미치지 않아야 한다.

AEM형 FSS 레이돔 설계를 위해서는 안테나와

「이 연구는 국방과학연구소 주관 사업의 일환으로 연구되었음.」

LIG 넥스원 ISR연구센터(LIG NEX1 ISR R&D Lab)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20111014-126

· 교신저자 : 김상근(e-mail : kimsangkeun@lignex1.com)

· 수정완료일자 : 2011년 12월 2일

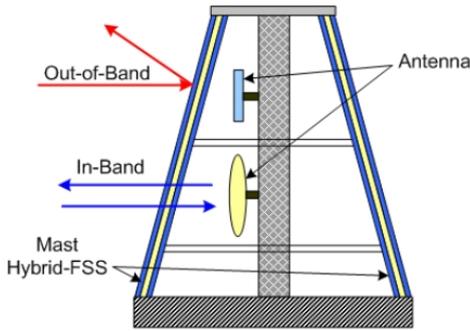


그림 1. AEM형 FSS 레이돔을 활용한 RCS 감쇄 효과
Fig. 1. RCS reduction using AEM FSS-radome.

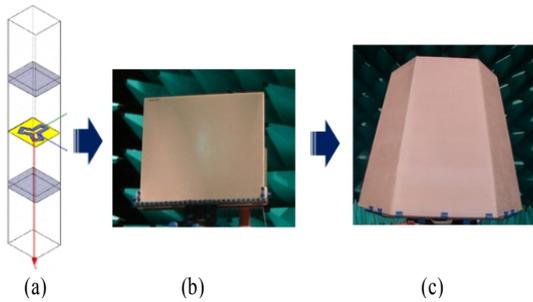


그림 2. (a) 무한 주기 구조 단위-셀 FSS 레이돔 시뮬레이션 구조, (b) 평판형 FSS 레이돔, (c) AEM형 FSS 레이돔

Fig. 2. (a) Geometry of infinite-periodic structure unit-cell FSS-radome simulation, (b) Flat FSS-Radome, (c) AEM FSS-Radome.

FSS 레이돔간 이격 거리가 근전계 영역에 있을 때의 전파 투과 특성 예측이 필요하다. 그러나 FSS 레이돔은 넓은 면적에 다수의 작은 FSS 패턴이 배열되어 있는 구조이기 때문에 시뮬레이션을 통해 거대한 AEM형 FSS 레이돔의 투과 특성을 확인하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 2와 같이 FSS 레이돔의 단위-셀 무한 주기 구조 시뮬레이션 해석을 통해 평면과 투과 조건 하에 원하는 대역 통과 특성을 갖는 FSS 레이돔을 설계하고, 평판형 FSS 레이돔을 평면과 조건하에 투과 특성을 검증한 후 X-밴드 AEM형 FSS 레이돔을 제작하였다. 이를 통해 기존의 투과율 특성 시험^[3]보다 실제 배열 안테나 사용 환경과 유사한 조건을 구현함으로써 FSS 레이돔이 안테나 패턴에 미치는 영향을 검증하였다.

II. FSS 레이돔 설계 및 제작

2-1 FSS 레이돔 단위-셀 설계

HFSS EM-simulator를 사용한 무한 주기 구조 해석기법^[4]을 활용하여 평면과 입사 조건 하에 FSS 레이돔 설계를 수행하였다. 그림 3(a)는 본 논문에서 제안하는 샌드위치형 FSS-hybrid의 층 구조이다. 외벽을 강하게 지지해 주는 Face층으로는 E-grass epoxy 계열의 복합재를 두었고, 가운데에는 polyimide film 위에 구리 패턴을 접착시킨 tripole-leg 형태의 FSS시트가 있으며, 위 아래로 위치한 foam층에 의해 일정 간격을 두고 face층과 접착된다. 그림 E-grass epoxy 재질은 강도가 500 Mpa 이상으로 매우 높으면서, 비중은 2 g/cm^3 이하로 가벼운 재질로써, 그림 3(a)와 같이 두 개의 face가 일정거리 이상 떨어진 샌드위치 구조로 제작될 경우 강도가 매우 높다는 장점을 가진다.

FSS 레이돔의 전파 투과율을 결정하는 설계 변수는 그림 3에 나타난 것과 같다. Foam 두께에 해당하는 “Tcu”와 “Tcl”은 설계 주파수의 반파장 길이를 가질 때 가장 투과 특성이 좋았으며, 다른 변수들에 대해 최적화 과정을 수행하여 통과 대역에서 투과 손실 -1 dB 이하, 저지 대역에서 투과 손실 -6 dB 이하로 설계하였다. 각 변수들에 대한 투과 특성 경향성을 우선 파악한 결과 “TF”의 두께가 얇고, 배열 간격에 해당하는 “ δ_a ”와 “ δ_b ”가 작을수록 투과율 특성이 좋은 것으로 나타났다. 그러나 복합재의 두께에 해당하는 “TF”의 두께를 얇게 하면 레이돔의 강도가 약해지므로, 최소 2 mm 이상으로 한정하여 최

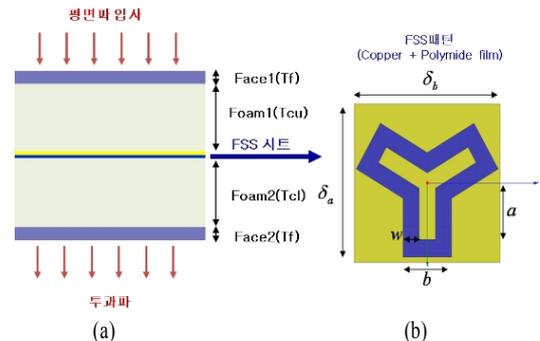


그림 3. (a) FSS 레이돔 층 구조, (b) 단위-셀 FSS-막 패턴

Fig. 3. (a) Layer of FSS-Radome, (b) Unit-cell FSS-sheet pattern.

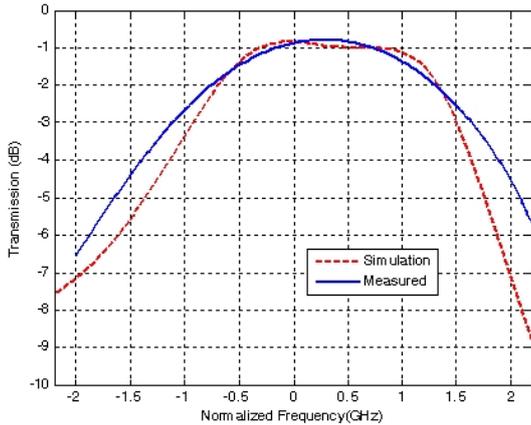


그림 4. 평판형 FSS 레이돔의 투과 손실
Fig. 4. Transmission loss of flat FSS-Radome.

적화 과정을 수행하였다. 제안하는 FSS 레이돔은 foam의 두께를 조정함으로써 공진 주파수의 변경이 용이하다는 장점을 가진다. 최적화된 FSS 레이돔의 상세한 설계값과 재질의 전기적 특성은 보안상 생략하였다.

2-2 평판형 FSS 레이돔 제작 및 검증

본 절에서는 시뮬레이션 해석을 통해 확인한 FSS 레이돔의 투과 특성을 실제 측정을 통해 검증한다. 평판과 조건에서 투과 특성을 확인하기 위해 혼-렌즈 안테나가 장착된 전파 투과율 측정 장비를 활용하였으며, 벡터 회로망 측정기를 사용하여 약 2,500개의 FSS 단위-셀을 포함한 450 mm×450 mm 크기의 평판형 FSS 레이돔의 투과 특성을 확인하였다. 그림 4에 단위-셀 시뮬레이션과 평판형 FSS 레이돔의 투과 손실 측정 결과를 나타내었으며, X-밴드 대역에서 약 28.1 % 이상의 대역폭을 가지며 중심 주파수에서 1 dB 이하의 삽입 손실을 가지는 것을 확인할 수 있다.

III. AEM형 FSS 레이돔의 안테나 영향 시험

본 절에서는 평판형 FSS 레이돔 전파 투과 시험을 통해 검증된 FSS-Hybrid 구조를 활용하여 그림 1의 (c)와 같이 절단된 육각뿔 형태의 AEM형 FSS 레이돔을 제작하고 16×16 배열 안테나를 적용하여 근전계 거리상에서의 전파투과 특성을 검증한다. AEM형 FSS 레이돔의 크기는 높이 2.4 m, 가로 2.3 m이고, 기울임각은 10 deg.로 제작하였다. 안테나와 FSS 레

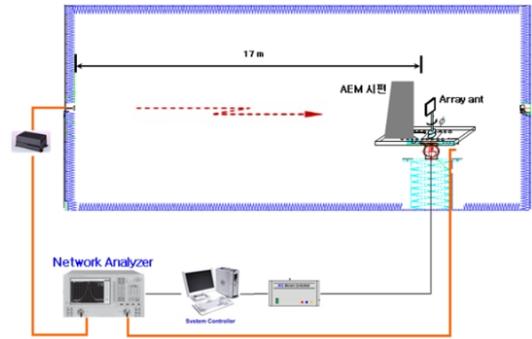


그림 5. AEM-FSS 레이돔 방사 패턴 시험
Fig. 5. Measurement of AEM-FSS radome radiation pattern.

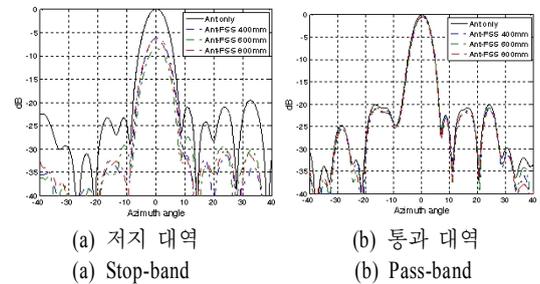


그림 6. 안테나와 FSS 레이돔 간 거리에 따른 안테나 패턴
Fig. 6. Radiation patterns as the distance between antenna and FSS-radome.

이들 간의 거리에 따른 안테나 패턴 영향성을 분석하기 위해 FSS 레이돔의 위치 이동이 가능하도록 그림 5와 같이 원전계 시험장을 구성하였다. 턴테이블을 이용하여 $-40^{\circ} \sim +40^{\circ}$ 까지의 안테나 패턴을 FSS 레이돔이 있는 경우와 없는 경우에 대해 시험하였다.

그림 6에는 안테나와 FSS 레이돔 간의 거리에 따른 저지 대역과 통과 대역에 대한 안테나 패턴 측정 결과를 나타내었다. 거리를 400 mm, 600 mm, 800 mm로 조절하며 측정한 결과, 통과 대역에서 거리에 따른 패턴의 변화는 없었다. 표 1에는 FSS 레이돔에 의한 안테나 패턴 변화를 거리 400 mm에 대해 저지 대역과 통과 대역을 구분하여 나타내었다. 통과 대역에서는 투과 손실이 0.5 dB이고, 빔 폭의 변화는 없었고, RMS 부엽 레벨도 0.8 dB 차이로 변화가 적었다. 반면에 저지 대역에서는 투과 손실이 6.5 dB이고, 빔 폭의 변화는 0.2도, RMS 부엽 레벨은 3.5 dB의 차이를 보였다. 이 결과를 통해 통과 대역에서는

표 1. FSS 레이돔에 의한 안테나 패턴 변화
Table 1. Comparison of antenna pattern variations due to FSS-Radome.

구 분		투과 손실 (dB)	빔 폭 (degree)	RMS 부엽 레벨 (dB)
안테나	저지 대역	-	7.1	-24.3
	통과 대역	-	5.6	-24.0
안테나 & FSS 레이돔	저지 대역	6.5	6.9	-27.8
	통과 대역	0.5	5.6	-24.8

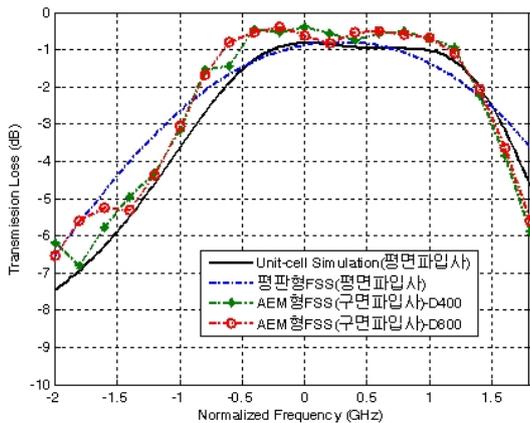


그림 7. 시뮬레이션 및 측정된 FSS 레이돔의 주파수 응답 특성
Fig. 7. Simulated and measured frequency response of FSS-radome.

FSS 레이돔이 안테나의 패턴에 영향을 미치지 않으면서 투과 손실 0.5 dB 이내의 좋은 투과 특성을 나타내었으며, 저지 대역에서는 6.5 dB 이상의 좋은 차단 특성을 보임을 확인할 수 있다.

그림 7에는 FSS 레이돔의 주파수 대역 통과 특성을 단위-셀 시뮬레이션 결과와 평판형 FSS 레이돔의 평면파 조건 결과, AEM형 FSS 레이돔의 안테나와의 이격 거리에 대한 전파 투과 특성을 비교하였다. 중심 주파수 대역폭에서의 투과 손실이 모두 1 dB 이하로 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. AEM형 FSS 레이돔의 주파수 선택적 전파 투과 특성은 안테나 빔 폭내의 값을 평균하여 안테나만 있는 경우에 대한 상대값으로 나타내었다. 이 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 FSS 레이돔은 평면파 조건과 근전계 조건에서 모두 동일한 주파수 선택적 전파 투과 특성을 보이며, 안테나와의 거리에 대한

영향이 없다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 안테나의 RCS를 감쇄시키기 위해 사용되는 FSS 레이돔을 단위-셀 무한 주기 구조 해석 기법을 적용하여 설계 및 제작하였다. 함정용 마스트에 적용될 수 있도록 AEM 형태로 제작하였으며, 평면파 입사 조건의 전파 투과율 시뮬레이션 결과 및 평판형 FSS 레이돔 시험 결과가 안테나 근전계 영역 조건에서의 전파 투과 특성과 동일함을 검증하였다. 실제로 근전계 조건에서 복잡도가 높은 FSS 패턴이 다수 배열되어 있고, 전기적 크기가 큰 FSS 레이돔을 설계할 때 수치 해석적 방법으로 해석하기에는 자원의 한계로 인해 어려움이 있다. 하지만 본 논문에서 검증한 평면파 입사 조건의 단위-셀 무한 주기 구조 해석 기법을 활용할 경우 많은 시간과 자원을 절감할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, AEM형 FSS 레이돔의 주파수 선택적 전파 투과 특성을 16×16 배열 안테나를 사용하여 400 mm 이격 거리에서 안테나 패턴 영향성을 확인한 결과, 통과 대역에서 0.5 dB 이하의 투과 손실을 갖고 빔 폭의 변화가 없었고, 부엽 레벨의 변화는 0.8 dB 이하로 영향이 거의 없었으며, 대역 통과 특성도 3 dB 대역폭이 X-band에서 약 28 %로 우수한 특성을 가진다. 또한, FSS 레이돔이 배열 안테나와 20도의 각도차를 가질 때 약 7.3 dB의 안테나 RCS 감쇄 효과를 가진다.

참 고 문 헌

- [1] Haiyan Chen, "Design of frequency-selective surfaces radome for a planar slotted waveguide antenna", *IEEE Trans. Antennas and Wireless Propagation*, vol. 8, no. 3, Aug. 2008.
- [2] Gregory C. Tavik, Charles L. Hilterbrick, "The advanced multifunction RF concept", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 3, Mar. 2005.
- [3] Stefania Monni, *Frequency Selective Surfaces Integrated with Phased Array Antennas*, Eindhoven : Technische Universiteit Eindhoven, 2005.
- [4] B. A. Munk, *Frequency Selective Surface : Theory and Design*, NewYork: Wiley-Interscience, 2000.