유한크기 FSS의 곡률효과에 따른 주파수 특성 해석

Analysis of Frequency Characteristics for the Finite Frequency Selective Surface with the Consideration of Curvature Effect

홍 익 표*

Ic-Pyo Hong

전 흥 재**

Heung-Jae Chun

이 명 건***

Myung-Gun Lee

정 용 식****

Yong-Sik Jung

Abstract

In this paper, we have analyzed the curvature effects of the finite FSS(frequency selective surface) using the 3-D method of moment using the BiCGSTab algorithm as an iterative method. To validate the analysis method in this paper, we compared the RCS(radar cross section) of PEC(perfect electric conductor) sphere with theoretical results and it shows well agreements. The tripole slot FSSs which have many application in military were selected for the investigation of curvature effect and RCS as a frequency characteristics were observed with the variation of the curvature rate. Simulation results shows that curvature effect can significant effect the passband frequency and bandwidth of FSS. We suggest that the curvature effect must be considered at the stage of design FSS application like FSS radome.

Keywords : Frequency Selective Surface(주파수 선택 표면구조), RCS(레이더 단면적), Frequency Characteristic(주파수 특성), Method of Moment(모멘트법)

1. 서론

임의의 주파수 대역을 차단 혹은 투과시키기 위해 사용되는 주파수 선택표면구조(FSS : Frequency Selective Structure)는 오래전부터 군용, 안테나의 레이돔, 이중 리플렉터 안테나 등 다양한 분야에서 사용되어 왔다.

유전체 판상 위에 도체 또는 슬롯이 주기적으로 배열된 구조를 FSS라 하며, 이 FSS 구조는 일종의 공간여파기로 특정 주파수만 투과시키거나 또는 반사시키는 특성을 갖는 전자기구조라고 볼 수 있다. 일반적으로 FSS의 전자기적 투과 및 반사 특성은 FSS를 구성하는 기본 단위셀의 크기와 형상, 배열 주기 및 배열 형상에 따라 달라지며, 개구면 타입의 FSS는 특정 주파수 대역을 투과시켜 유도성(inductive) FSS, 패치 타입의 FSS는 특정 대역을 반사시키는 특성을 가지므로 용량성(capacitive) FSS라고 한다^[1]. 이러한 특성으로 인해 주로 안테나의 레이돔 또는 반사판, 최근에는 마이크로파 공학 또는 광학분야에 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 FSS 구조의 대역 통과 및

† 2012년 8월 16일 접수~2012년 11월 23일 게재승인

* 공주대학교(Kongju National University)

** 연세대학교(Yonsei University)

*** 국방과학연구소(ADD)

**** 광운대학교(Kwangwoon University)

책임저자 : 홍익표(iphong@kongju.ac.kr)

저지 특성을 이용하여 안테나의 지향성을 향상하기 위한 방법에 대한 연구가 이루어지고 있는데, 이는 다수의 단일 안테나를 배열하는 배열 안테나의 가장 큰 단점인 크고 복잡한 급전구조와 이에 따른 큰 전력손실을 보완하는 방법으로 사용되고 있으며^[2,3], 과라볼라 반사기와 급전 혼안테나 사이에 FSS구조를 두어 본래 초점 외에 가상의 초점을 얻어 독립된 안테나가 하나 더 있는 효과를 얻음으로써 여러 주파수 대역을 사용하는 위성 안테나의 무게와 부피 및 제작 비용면에서 효율성을 높이는 등 여러 가지 분야로 응용되고 있다^[4,5].

특히, 국방분야에서는 대역 통과 필터 또는 대역 저지 필터로서 레이더 신호를 흡수 또는 반사할 수 있는 FSS를 이용한 RCS 감소 기술 등과 관련하여 스텔스 기술에 FSS를 응용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 국방기술에 적용하기 위한 FSS 관련 연구는 주로 미국과 유럽을 중심으로 한 선진국을 중심으로 연구가 이루어져 왔으며 중요한 군사기술 중 하나로 분류되어 기술이전이 엄격하게 금지가 되고 있는 실정이다. 특히, FSS 관련 연구 중 평면구조와 관련한 연구는 기존에 이미 여러 가지 해석방법들이 알려져 있는데 반하여, 실제 항공기나 미사일 또는 함정 등에 적용하기 위한 FSS 구조는 곡면구조와 같은 입체구조 형상을 갖기 때문에 일반화된 전자기 해석과정이 알려져 있지 않으며, 국외 소수 연구그룹을 중심으로 제한적인 연구가 이루어지고 있다.

본 논문에서 다루고자 하는 곡면을 갖는 곡면 FSS 구조의 해석 경우 Cwik과 Mittra는 1988년 평면근사법과 수치해석법을 이용하여 원통형 또는 구형의 곡면형 FSS의 전파특성에 대해 연구를 하였으며^[6], Parker 등은 Pocklington 방정식과 Ray Tracing 방법에 기반한 해석방법을 이용하여 곡면형 FSS 구조를 해석하였다^[7]. 최근에는 Volume-Surface 적분방정식이나^[8], 임피던스 경계조건^[9] 등을 이용한 곡면 FSS 구조 전파해석방법이 제안되어 왔다. 그러나 발표된 대부분의 연구결과들은 원통형구조의 Dipole이나 Patch와 같은 특정형태의 FSS구조와 관련한 연구로 제한되어 있거나 유한구조가 아닌 무한구조를 가정한다는 단점이 있다.

본 논문에서는 입사각에 따른 안정성과 편파에 대한 우수한 특성으로 FSS 레이돔과 같은 군사적 응용으로 널리 사용되는 유한크기를 갖는 Tripole Slot 구조^[10]의 곡률에 따른 RCS 특성을 해석하고 분석하였다. 본 논문에서 해석하고자 하는 유한곡면 FSS의 경우 도체로

이루어졌기 때문에 전기장적분방정식(EFIE : Electric Field Integral Equation)에 기반하여 1982년 Rao 등^[11]에 의해 제안된 3차원 모멘트법을 기반으로 하였다. 일반적으로 모멘트법에서 해석하고자 하는 행렬의 크기가 커짐에 따라 발생하는 해석시간의 비효율성을 개선하기 위해 반복법 중 하나인 BiCGSTab(Biconjugate Gradient Stabilized) 알고리즘^[12]을 적용하였다.

2. 3차원 모멘트법

본 논문에서 유한크기를 갖는 곡면구조의 Tripole Slot FSS의 RCS 특성을 해석하기 위해 사용한 방법은 1982년 Rao 등에^[11] 의해 제안된 RWG(Rao Wilton Glisson) 함수를 기저함수로 이용하는 EFIE 기반 3차원 모멘트법을 기반으로 하였다. 전체 필드를 $\mathbf{E}$ 라고 할 때 FSS에 입사되는 평면파 $\mathbf{E}^i$ 와 산란되는 전기장 $\mathbf{E}^s$ 사이에는 식 (1)과 같은 관계가 있으며, FSS는 PEC로 이루어졌기 때문에 $\mathbf{E}_{tan} = 0$ 을 만족하여 식 (2)가 성립한다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s \quad (1)$$

$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{j}{4\pi\omega\epsilon} \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dS \quad (2)$$

여기서 $\Phi(\mathbf{r})$ 은 스칼라 포텐셜이며, S 는 FSS의 표면, $\mathbf{J}$ 는 표면의 전류분포, $G(\cdot)$ 는 매질의 그린함수를 의미한다.

Fig. 1. RWG 함수 적용을 위한 삼각형 패치^[11]

Rao에 의해 제안된 RWG 함수는 식 (3)과 같이 해석하고자 하는 물체의 표면을 Fig. 1과 같은 삼각형 메쉬로 나누고 각각의 삼각형 요소에 유도되는 전류를 구하는 방법이다. 식 (3)에 주어지는 각 변수는 Fig. 1에 나타내었다. 여기에서 $a_n^\pm$ 는 각 삼각형의 면적을 나타낸다.

$$\mathbf{f}_n^\pm(\mathbf{r}) = \begin{cases} \frac{l_n}{2a_n^\pm} \boldsymbol{\rho}_n^\pm, & \mathbf{r} \in T_n^\pm \\ 0 & \mathbf{r} \notin T_n^\pm \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)으로 주어지는 RWG 함수에 의해 전류분포 $\mathbf{J}$ 를 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \sum_{n=1}^N J_n \mathbf{f}_n(\mathbf{r}) \quad (4)$$

식 (4)에서 주어지는 전류분포의 계수 J_n 을 구하기 위해서는 식 (2)에 Galerkin 방법을 적용해서 구해야 하며, 이 때 다음과 같은 행렬식을 풀어야 한다. 이 때 $[Z_{mn}]$ 은 해석구조에 의해 결정되는 임피던스 행렬이고, $[V_m]$ 은 해석구조에 인가되는 소스이다.

$$[Z_{mn}][J_n] = [V_m] \quad (4)$$

일반적으로 위 식 (4)는 이미 널리 알려진 가우스 소거법 또는 LU Decomposition 방법을^[13] 이용해서 전류분포의 계수를 구할 수 있으나, 행렬의 크기가 커지는 경우 계산속도가 증가한다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 반복법을 이용하여 계수를 구하는 방법이 제안되어 왔다. 반복법은 행렬이 대칭 행렬인지 여부 등 다양한 조건에 대해 CGM(Conjugate Gradient Method), BiCGM(Biconjugate Gradient Method), CGS(Conjugate Gradient Squared) 그리고 BiCGSTab(Biconjugate Gradient-Stabilized) 방법 등이 제안되어 왔다^[13]. 본 논문에서는 이 중에서 비교적 수렴속도가 빠르고 CGS에 비해 안정된 수렴특성을 갖는 BiCGSTab 알고리즘^[12]을 사용하였다.

본 논문에서 사용한 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 1m 직경을 갖는 완전도체(PEC) 구에 대해 RCS 특성을 검증하였다. Fig. 2에 RCS 특성 비교를 위해 이론적 해석결과인 Mie 결과와 비교를 하여 나타내었으며 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Fig. 2. PEC 구에 대한 RCS 특성해석 비교

Fig. 3. 반복법에 따른 수렴속도의 비교

Fig. 3에 3차원 모멘트법에 행렬연산의 반복법으로 CGM, BiCGM, BiCGSTab 알고리즘과 직접법인 가우스 소거법을 적용하여 수렴조건에 따른 계산속도를 비교하여 나타내었다. 본 논문에서 사용한 BiCGSTab 알고리즘이 동일한 환경에서 동일한 전자기문제를 해석하는 경우에 수렴조건이 $1.0e-6$ 인 경우 가우스소거법에 비해 약 65% 정도 속도가 개선되었으며, CGM 방법에 비해서는 약 75% 정도 속도가 개선되는 것을 확인하였다.

3. 곡률에 따른 Tripole Slot FSS의 RCS 특성 해석

본 논문에서 해석하기 위해 편파에 대한 안정된 특성으로 일반적으로 널리 사용되는 Fig. 4와 같은 두

가지 형태의 Tripole Slot FSS 구조를 선택하였다. Fig. 4(a)에 나타난 Tripole Slot FSS(A) 구조는 78mm×88mm의 크기를 가지며 Fig. 4(b)에 나타난 Tripole Slot FSS(B) 구조는 200mm×200mm의 크기를 가지며, X-Band(8~12GHz)에서 동작하도록 설계되었다.

(a) Tripole Slot FSS(A)

(b) Tripole Slot FSS(B)

Fig. 4. 유한평면 Tripole Slot FSS 구조

Fig. 5에는 본 논문에서 해석하고자 하는 Fig. 4(a)의 유한한 평면 구조 Tripole Slot FSS(A) 구조에 대해서 본 논문에서 제안한 해석방법과 상용 EM소프트웨어인 HOBBIES^[14]를 이용하여 해석한 RCS 결과를 비교

하여 나타내었다. FSS의 수직방향에서 입사하는 평면파를 가정하였으며 입사하는 위치에서 산란되는 파로부터 RCS를 계산하였다. 두 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있으며, 본 논문에서 해석하기 위해 사용한 해석 알고리즘이 유효함을 확인하였다.

(a) HOBBIES Simulation

(b) 본 논문의 해석결과

Fig. 5. 유한평면 Tripole Slot FSS(A) 구조의 RCS 특성 비교

본 논문에서 설정한 곡률을 갖는 유한크기 Tripole Slot FSS 구조를 설정하기 위해 Fig. 6(a)와 같이 곡률 R을 정의하였다. 평면인 경우 $R = \text{Infinity}$ 로 정의할 수 있으며, R 값이 작을수록 곡률이 커진다. 본 논문에서는 평면형태의 FSS의 설계치수가 변하지 않도록 단일곡률 R을 적용하였으며 따라서 Fig. 6(b)와 같이 원통형 구조의 일부형태를 가지게 된다.

(a) 곡률 R

(b) 곡률 R을 갖는 Tripole Slot FSS(B) 메쉬

Fig. 6. 곡률을 갖는 유한크기 Tripole Slot FSS

Fig. 7과 Fig. 8에 각각 Tripole Slot FSS(A)와 Tripole Slot FSS(B) 구조에 대해 곡률 R의 변화에 따른 RCS 특성을 나타내었다. Fig. 7에는 Tripole Slot FSS(A) 구조의 곡률 R을 각각 0.05m, 0.1m, 0.5m 변화시켰을 때 공진주파수는 14.5GHz, 12.2GHz, 10.3GHz로 각각 변화하였으며, R 값이 커질수록 Fig. 4(b)에 나타난 R = infinity(평면)인 경우의 RCS 특성에 가까워짐을 확인할 수 있다.

Fig. 8에는 Tripole Slot FSS(B) 구조의 곡률 R의 변화에 대한 RCS 특성 변화를 나타내었으며, 곡률 R을 각각 0.1m, 0.5m, 1m로 변화시켰을 때 공진주파수는 9.5GHz의 광대역, 9.5GHz, 11GHz로 각각 변화하였으며, R = 0.1m인 경우에 통과대역폭이 늘어나지만 대역 외 특성에서 기생성분이 심해지는 현상을 관찰 할 수 있다.

(a) R = 0.05m

(b) R = 0.1m

(c) R = 0.5m

Fig. 7. Tripole Slot FSS(A)의 곡률에 따른 RCS 특성 변화

(a) $R = 0.1m$

(b) $R = 0.5m$

(c) $R = 1m$

Fig. 8. Tripole Slot FSS(B)의 곡률에 따른 RCS 특성 변화

4. 결 론

본 논문에서는 스텔스 기술에서 RCS를 감소시키기 위한 중요한 기술 중 하나인 FSS 설계기술과 관련하여, 실제로 무기체계에 적용하기 위한 실제 형태로서 곡면 FSS의 주파수특성을 해석하였다. 곡률을 갖는 FSS의 주파수 특성을 해석하기 위해 RWG 함수를 적용한 3차원 모멘트법을 사용하였으며, 계산시간의 단축을 위하여 반복법으로 BiCGSTab 기법을 적용하였다. 해석방법을 검증하기 위하여 주로 사용되는 PEC 구에 대한 RCS 특성을 해석하여 이론적인 Mie 계산값과 비교하여 일치함을 확인하였다. 일반적으로 많이 사용되는 두 가지 종류의 Tripole Slot FSS 구조에 대해 곡률 R 의 변화에 따라 주파수 특성으로 RCS 특성의 변화를 관찰하였다. 곡률의 변화에 따라 평면형태에서 설계된 중심주파수의 이동뿐만 아니라 대역폭의 이동도 무시할 수 없을 만큼 생긴다는 사실을 확인하였다.

따라서, 본 논문의 결과로부터 실제 무기체계에 적용되는 FSS를 위해서는 유한크기, 곡면형상을 고려한 정확한 주파수 특성 해석이 이루어져야 하며 향후 제작을 통한 실험검증도 이루어져야 한다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다

References

- [1] S. W. Lee, G. Zarrillo, and C. L. Law, "Simple Formulas for Transmission Through Metal Periodic Grids or Plates", IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 30, No. 5, pp. 904~909, Sep. 1982.
- [2] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Design of a Frequency Selective Surface(FSS) Type Superstrate for Dual-band Directivity Enhancement of Microstrip Patch Antenna", IEEE Antennas & Propagation Society International Symposium, Vol. 34, No. 5, pp. 462~467, Jul. 2005.
- [3] Y. J. Lee, J. Yeo, R. Mittra, and W. S. Park, "Thin

- Frequency Selective Surface(FSS) Superstrate with Different Periodicities for Dual-band Directivity Enhancement”, IEEE International Workshop on Antenna Technology : Small Antennas and Novel Metamaterials(IWAT), pp. 375~378 Mar. 2005.
- [4] G. H. Schennum, “Frequency-selective Surfaces for Multiple Frequency Antenna”, Microwave Journal, Vol. 16, pp. 55~57, May. 1973.
- [5] V. D. Agrawal, and W. A. Imbriale, “Design of Dichroic Cassegrain Subreflector”, IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 27, No. 4, pp. 466~473, July. 1979.
- [6] T. Cwik and R. Mittra, “The effects of the Truncation and Curvature of Periodic Surfaces : A Strip Grating”, IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 36, No. 5, pp. 612~622, May. 1988.
- [7] B. Philips, E. A. Parker and R. J. Langley, “Ray Tracing Analysis of the Transmission Performance of Curved FSS”, IEE Proc. of Microwaves, Antennas & Prop., pp. 193~200, 1995.
- [8] D. Ding, S. Tao and R. Chen, “Fast Analysis of Finite and Curved Frequency Selective Surface using the VSIE with MLFMA”, Int. J. Numer. Model., Vol. 24, No. 5, pp. 425~436, Sep. 2010
- [9] Stupfel B., and Pion. Y, “Impedance Boundary Conditions for Finite Planar and Curved Frequency Selective Surfaces”, IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 53, No. 4, pp. 1415~1425, Apr. 2005.
- [10] B. Munk, Frequency Selective Surface : Theory and Design, New York, John Wiley & Sons, 2000.
- [11] S. Rao, D. Wilton, and A. Glisson, “Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape”, IEEE Trans. on Antennas & Prop., Vol. 30, pp. 409~418, May. 1982.
- [12] E. Topsakal, R. Kindt, K. Sertal and J. Volakis, “Evaluation of the BICGSTAB(*l*) Algorithm for the Finite-Element/Boundary-Integral Method”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 43, No. 6, pp. 124~131, Dec. 2001.
- [13] Walton C. Gibson, “The Method of Moments in Electromagnetics”, Chapman & Hall/CRC, 2008.
- [14] <http://www.em-hobbies.com>