

FSS 단위셀 배열구조에 따른 구형 주파수 선택 구조의 RCS 특성비교

Comparisons of RCS Characteristic of Spherical Frequency Selective Surfaces with FSS Element Arrangement

홍익표*, 이인곤*

Ik-Pyo Hong*, In-Gon Lee*

Abstract

In this paper, we analyzed the electromagnetic characteristics of the spherical frequency selective surface with different arrangement of crossed dipole slot elements for reducing the RCS (radar cross section). The three dimensional MOM (method of moment) with RWG basis is used to analyze the proposed structure. To reduce the simulation time, we applied the BiCGSTab (Biconjugate Gradient Stabilized) algorithm as an iterative method and presented the comparison results with Mie's theoretical results for PEC sphere to show the validity of this paper. From the simulation results, the different arrangement of elements array showed the difference RCS that cannot be negligible. The arrangement method of element in frequency selective surface will be one of variables for the design of curved frequency selective structures.

요약

본 논문에서는 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)을 감소시키기 위한 전자파 구조로서 십자형 다이폴 슬롯을 원소로 가지며 다른 배열형태 구조를 갖는 구형 주파수 선택적 표면(FSS, Frequency Selective Surface) 구조의 전파특성을 해석하였다. 유한크기와 곡면형상을 갖는 구형 주파수 선택적 표면 구조의 주파수 특성을 해석하기 위해 RWG 함수를 적용한 3차원 모멘트법을 사용하였으며 반복법 중 하나인 BiCGSTab(Biconjugate Gradient Stabilized) 알고리즘을 적용하여 해석시간의 효율성을 개선하였다. 1m 직경을 갖는 완전도체(PEC, Perfect electric conductor)의 구에 대한 이론적 해석결과인 Mie의 RCS 특성과 비교 검증하여 제안한 해석 알고리즘의 유효함을 입증하였다. 구형 주파수 선택적 표면 구조에서 슬롯 성분의 배열 방법에 따른 RCS 변화를 관찰하여 비교하였으며, 곡면형상의 주파수 선택구조 설계시 배열의 방법이 RCS 특성에 중요한 변수가 될 수 있음을 확인하였다.

Key words : Radar Cross Section, Frequency Selective Surface, Biconjugate Gradient Stabilized Algorithm

* Dept. of Information & Communication Engineering, Kongju National University)
iphong@kongju.ac.kr +82-41-521-9199

※ Acknowledgment : This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0023742)

Manuscript received Sep 5, 2012; revised Nov 10, 2012 ; accepted Nov 19, 2012

1. 서론

도전성을 가지는 패치 또는 슬롯이 주기적으로 배열되어 특정 주파수만 투과시키거나 또는 반사시키는 특성이 있는 전자기구조를 주파수 선택적 표면(FSS, Frequency Selective Surface)구조라 한다. 이 주파수 선택적 표면 구조는 일반적으로 기본 단위요소의 형상과 크기, 배열 주기 및 배열 형상에 따라 전자기적

특성이 달라진다. 특히, 이와 같은 주파수 선택적 표면 구조의 주파수 대역 통과 또는 차단 특성을 이용하면 특정한 레이더 신호를 흡수하거나 또는 반사시킬 수 있기 때문에 항공기, 미사일, 함정 등의 탐지 가능성을 줄이기 위한 스텔스 기술과 관련하여 활발하게 연구가 이루어지고 있다. 레이더의 탐지나 흡수와 관련한 성능을 나타내는 지표는 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)이라고 하며, RCS 가 낮다는 것은 레이더에 탐지될 확률이 낮다고 볼 수 있다. 이러한 RCS를 저감하기 위한 설계 기술은 입사하는 전자기파를 레이더의 방향이 아닌 다른 방향으로 산란시키는 반사파 감소형상화 기술과 능동/수동 소자를 이용한 기술, 그리고 입사하는 전자기파의 흡수 또는 간섭을 통해 소멸시키는 전자기파 흡수 재료(RAM, Radar Absorbing Material)를 사용하는 방법으로 분류 될 수 있다[1]. 전자기파에 대한 스텔스 기술 중 형상화기술은 표적의 외형을 조절하여 입사된 전자기파를 다른 방향으로 산란시키는 기술로 고주파일수록 효율이 뛰어난 반면에 표적의 공기역학, 열 특성, 구조 설계 문제 등의 분야와 대치되기 때문에 실제적인 적용에는 한계가 따른다. 능동/수동 소자를 이용한 기술은 표적의 지정된 위치에 적용하여 최대의 전자기파 흡수성능을 구현할 수 있지만, 매우 협소한 대역폭 및 방향성을 갖는다는 단점이 있다. 전자기파 흡수 재료를 이용한 RCS 저감기술은 유전성 또는 자성체 재료를 이용하여 입사된 전자기파 에너지를 흡수하여 반사파를 최소화하는 기술로, 다층구조로 확장하면 광대역 특성을 구현 할 수 있는 장점이 있다. 또한 전자기파 흡수 재료 외에 RCS를 효율적으로 줄이기 위한 방법으로 전자기파를 흡수하는 인공적인 전자기파 흡수구조(RAS, Radar Absorbing Structure), 특히 무한한 평면 위에 주기적으로 반복되는 특정 패턴을 이용한 FSS 구조의 응용연구도 활발하게 이루어지고 있다.

지금까지 주파수 선택적 표면 구조의 특성 해석과 관련한 연구들은 무한한 평면 위에 FSS 단위셀이 주기적으로 반복되는 구조에 대하여 Floquet 이론을 기반으로 해석되어왔다. 그러나 항공기나 미사일 등에서 실제 사용되는 FSS 구조는 유한한 구조를 가지며 또한 대부분 곡면형 구조를 갖는다.

곡면형태 주파수 선택 구조 연구와 관련해서 Cwik 과 Mittra 는 1988년 평면근사법과 수치해석법을 이용하여 원통형 또는 구형의 곡면형 주파수 선택적 표면의 전파특성에 대해 연구를 하였으며[2], Parker 등은 Pocklington 방정식과 Ray Tracing 방법에 기반한 해석방법을 이용하여 곡면형 주파수 선택적 표면 구조를 해석하였다[3]. 최근에는 Volume-

Surface 적분방정식이나[4], 임피던스 경계조건[5] 등을 이용한 곡면 주파수 선택적 표면 구조의 전파해석 방법이 제안되어 왔다. 그러나 발표된 대부분의 연구 결과들은 원통형구조의 곡면으로 제한적이고 Dipole 이나 Patch 와 같은 특정형태의 FSS 단위셀로 제한되어 있다는 단점이 있으며, 최근에서야 구형구조의 FSS 와 관련한 연구가 일부 진행되고 있다[6][7].

국내에서는 평면형을 곡면형으로 설계했을 때 발생하는 FSS 단위셀의 크기, 단위셀 간의 간격 등이 작아지는 효과와 유전체의 두께변형으로 인한 공진주파수와 대역폭의 변화 등을 상용 소프트웨어를 사용하여 연구하였으나 역시 무한한 구조를 가정하였다는 단점과 해석결과의 신뢰성이 부족하다는 단점이 있다[8][9].

본 논문에서는 유한크기를 가지며 곡면구조인 FSS 중에서 구형 구조를 갖는 FSS 의 전파특성을 해석하였다. FSS 단위셀로는 국방분야에서 널리 사용되는 구조로서 X-band에서 공진특성을 갖도록 Crossed Dipole Slot 구조를 설계하였다. 구형 구조를 갖는 FSS 의 경우 원통형 FSS 구조와 달리 FSS 단위셀의 배열방법이 다양하게 구현될 수 있으며, 본 논문에서는 배열가능한 방법으로 방사형, 원형, 그리고 정방형 배열을 설정하여 각각의 배열 방법에 따른 RCS 특성을 관찰하였다. 이러한 서로 다른 배열구조를 갖는 유한 구조의 구형 FSS 구조해석을 위해서는 3차원 전자기 해석방법이 필요한데 기존의 FDTD/FEM 과 같은 방법은 계산시간이나 3차원 구조 모델링에 따른 메모리의 비효율성이 발생하게 된다. 본 논문에서 해석하고자 하는 유한곡면 주파수 선택적 표면 구조의 경우 도체로 이루어졌기 때문에 전기장적분방정식(EFIE, Electric Field Integral Equation)에 기반하여 1982년 Rao 등[10]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[11]을 적용하였다.

본 논문에서는 제안된 3차원 해석 알고리즘을 이용하여 유한크기를 갖는 구형 Crossed Dipole Slot FSS 구조의 단위셀의 배열 방법에 따른 주파수 선택적 표면 구조의 특성을 해석하고 분석하였다. 구형 주파수 선택구조에서 배열가능한 방법으로 방사형, 원형, 그리고 정방형 배열을 설정하여 각각의 배열 방법에 따른 RCS 특성을 관찰하였다.

II. 3차원 모멘트법

본 논문에서 유한크기를 갖는 곡면구조의 Crossed Dipole Slot FSS의 RCS 특성을 해석하기 위해 1982년 Rao 등에[10] 의해 제안된 RWG(Rao Wilton Glisson) 함수를 기저함수로 이용하는 EFIE 기반 3차원 모멘트법을 기반으로 사용하였다. 전체 필드를 라고 할 때 FSS 에 입사되는 평면파 \mathbf{E}^s 와 산란되는 전기장 \mathbf{E}^o 사이에는 식 (1) 과 같은 관계가 있으며, FSS 는 PEC 로 이루어졌기 때문에 $\mathbf{E}_{tan} = 0$ 을 만족하여 식 (2)가 성립한다.

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

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

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

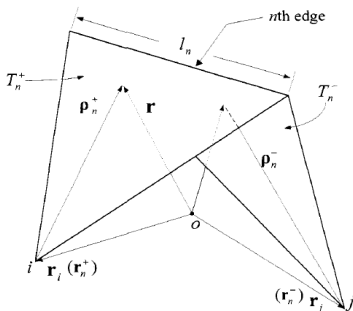


Fig. 1. Triangular Patch for RWG basis function
그림 1. RWG 함수 적용을 위한 삼각형 패치[10]

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

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

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

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

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.

$$[Z_{mn}][J_n] = [V_m] \quad (5)$$

```

Initial steps:
  Guess  $\mathbf{x}_0$ 
   $\mathbf{r}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}_0$ 
   $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r}_0$ 
For  $i = 1, 2, \dots$ , until convergence:
   $\rho_{i-1} = \tilde{\mathbf{r}}_{i-1} \cdot \tilde{\mathbf{r}}$ 
  If  $\rho_{i-1} = 0$  method fails
  If  $i = 1$ 
     $\mathbf{p}_1 = \mathbf{r}_0$ 
  else
     $\beta_{i-1} = (\rho_{i-1} / \rho_{i-2})(\alpha_{i-1} / \omega_{i-1})$ 
     $\mathbf{p}_i = \mathbf{r}_{i-1} + \beta_{i-1}(\mathbf{p}_{i-1} - \omega_{i-1}\mathbf{v}_{i-1})$ 
  endif
   $\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{p}_i$ 
   $\mathbf{v}_i = \mathbf{A}\hat{\mathbf{p}}$ 
   $\alpha_i = \rho_{i-1} / (\tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{v}_i)$ 
   $\mathbf{s} = \mathbf{r}_{i-1} - \alpha_i \mathbf{v}_i$ 
  Check norm of  $\mathbf{s}$ , if small enough set  $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{i-1} + \alpha_i \hat{\mathbf{p}}$ , stop
   $\hat{\mathbf{s}} = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{s}$ 
   $\mathbf{t} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{s}}$ 
   $\omega_i = (\mathbf{t} \cdot \mathbf{s}) / (\mathbf{t} \cdot \mathbf{t})$ 
   $\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_{i-1} + \alpha_i \hat{\mathbf{p}} + \omega_i \hat{\mathbf{s}}$ 
   $\mathbf{r}_i = \mathbf{s} - \omega_i \mathbf{t}$ 
  If  $\|\mathbf{r}_i\|_2 < \epsilon \|\mathbf{b}\|_2$ , stop iteration
end
    
```

Fig. 2. Algorithm of BiCGSTab
그림 2. BiCGSTab 알고리즘[11]

일반적으로 위 식 (5)는 이미 널리 알려진 가우스 소거법 또는 LU Decomposition 방법을[9] 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 대칭행렬인지 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[11]. 본 논문에서는 이 중에서 비교적 수렴속도가 빠르고 비대칭 행렬의 연산에도 적용이 가능한 BiCGSTab 알고리즘을 사용하였다. BiCGSTab 알고리즘은 계산량은 BICGM 방법과 유사하고, 전치행렬의 연산이 필요하지 않으며, CGS 에 비해 안정된 수렴특성을 갖는 BiCGSTab 알고리즘[11][12]을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 BiCGSTab 알고리즘을 그림 2 에 나타내었다.

본 논문에서 사용한 해석 알고리즘을 검증하기 위하여 1m 직경을 갖는 완전도체구에 대해 RCS 특성을 검증하였다. 그림 3 에 RCS 특성 비교를 위해 이론적 해석결과인 Mie 결과와 비교를 하여 나타내었으며 잘 일치하는 것을 확인하였다.

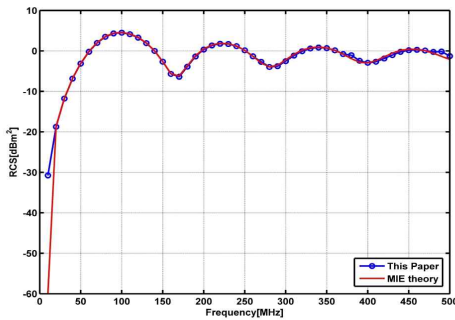


Fig. 3. RCS Comparisons for PEC Sphere
그림 3. PEC 구에 대한 RCS 특성해석 비교

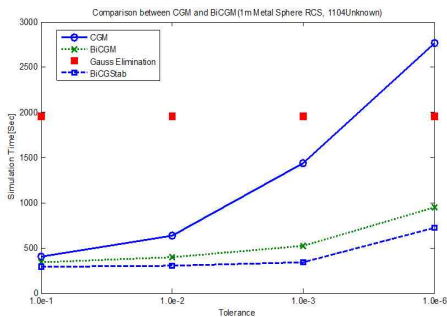


Fig. 4. Comparison of Convergence speed for different iterative method
그림 4. 반복법에 따른 수렴속도의 비교

그림 3 에서 비교한 동일한 1m 직경을 갖는 완전도체 금속구의 Monostatic RCS 계산을 기준으로 그림 4 에 3차원 모멘트법에 행렬연산의 반복법으로 CGM, BiCGM, BiCGSTab 알고리즘과 직접법인 가우

스 소거법을 적용하여 수렴조건에 따른 계산속도를 비교하여 나타내었다. 본 논문에서 사용한 BiCGSTab 알고리즘이 동일한 환경에서 동일한 전자기문제를 해석하는 경우에 수렴조건이 $.0e-6$ 인 경우 가우스 소거법에 비해 약 65% 정도 속도가 개선되었으며, CGM 방법에 비해서는 약 75% 정도 속도가 개선되는 것을 확인하였다.

III. 배열형태에 따른 구형 Crossed Dipole Slot FSS의 RCS 특성 해석

본 논문에서 제안하는 해석 알고리즘을 구형의 FSS 구조에 적용하기 위해 기본 평면 FSS 구조로서 그림 5 와 같은 유한크기를 갖는 평면형 Crossed Dipole Slot FSS 구조를 해석하였다. 그림 5 에 나타낸 평면형 Crossed Dipole Slot FSS 구조는 $75mm \times 75mm$ 의 크기를 가지며 X-Band ($8 \sim 12GHz$)에서 동작하도록 설계하였다.

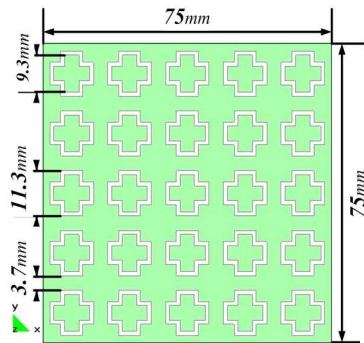


Fig. 5 Finite Planar FSS with Crossed Dipole Slot
그림 5. 유한평면 Crossed Dipole Slot FSS 구조

그림 6 에는 본 논문에서 해석하고자 하는 그림 4 의 유한크기를 갖는 평면형 Crossed Dipole Slot FSS 구조에 대하여 본 논문에서 제안한 해석방법과 상용 EM소프트웨어인 HOBBIES[13]를 이용하여 해석한 RCS 결과를 비교하여 나타내었다. HOBBIES 는 본 논문에서와 같은 모멘트법 알고리즘을 사용하며, 행렬계산은 직접법, In Core 또는 Out of Core를 사용하는 병렬처리 알고리즘, 사각메쉬, 고차 기저함수등을 적용하여 유한한 크기를 갖는 물체의 RCS 특성에 대한 신뢰도가 비교적 높은 상용 소프트웨어이다. HOBBIES 의 경우 사각메쉬-고차모드 기저함수를 사

용하여 1265 Unknown을 사용하였고, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 경우 삼각형 메쉬로 944 Unknown을 사용하였고 계산시간의 경우 HOBBIES는 306초, 본 논문에서 제안한 알고리즘의 경우 320초가 소요되어 계산시간의 경우 비교적 큰 차이가 나지 않았다. FSS 구조의 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.

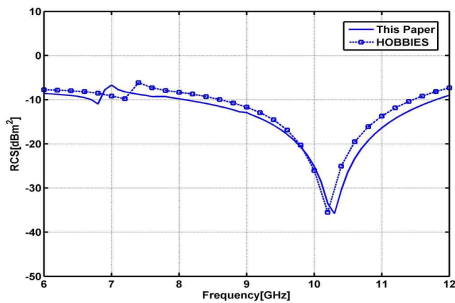


Fig. 6. RCS Comparison results between this paper and HOBBIES

그림 6. 유한평면 Crossed Dipole Slot FSS 구조의 RCS 특성 비교

유한크기를 갖는 평면형과 달리 곡면형인 구형의 FSS 구조가 갖는 특징과 구형 FSS 구조의 배열 방법에 따른 특성 변화를 관찰하기 위해 동일한 단위셀 제원을 갖는 FSS 구조를 설계하였고 그림 7에 나타내었다. 그림 7의 (a), (b), (c)는 그림 4에서 제안한 Crossed Dipole Slot 구조를 각각 방사형, 원형, 정방형 배열 같이 설계치수가 변하지 않도록 고정된 곡면의 형상위에 각기 다른 배열한 구조의 전면부를 나타내며, 그림 7 (d)는 구형 FSS 구조의 측면부를 나타내었다.

그림 8에 그림 7의 (a) 방사형 Type A, (b) 원형 Type B, (c) 정방형 Type C와 같은 배열구조에 따른 RCS 특성과 FSS가 없는 도체구조의 RCS 특성을 나타내었다. 그림 7 (d)에 표시한 바와 같이 구형 FSS 구조에 수직으로 입사하는 전자파를 가정하였으며 FSS 특성을 관찰하기 위하여 반대편에서 나타나는 투과특성, 즉 Bistatic RCS를 계산하였다. FSS가 없는 도체구조의 경우 예상되는 바와 같이 공진주파수가 나타나지 않으며 입사되는 모든 전자파를 반사하고 있음을 알 수 있다. Type A, Type B, Type C

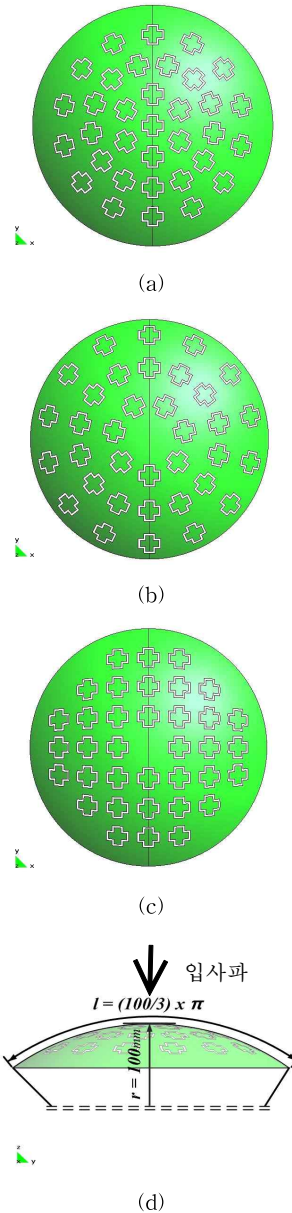


Fig. 7. The Finite Spherical FSS with Crossed Dipole Slot (a) Type A(Top view) (b) Type B(Top view) (c) Type C(Top view) (d) Side view

그림 7. 유한크기를 갖는 구형 Crossed Dipole Slot FSS (a) Type A(Top view) (b) Type B(Top view) (c) Type C(Top view) (d) Side view

의 공진주파수는 각각 9.1GHz, 9.4GHz, 9.4GHz 이며, Type A와 Type B는 공진주파수와 통과대역에 대하여 차이를 보였으며, Type B, Type C는 통과대역에서 차이를 확인 할 수 있었다. 또한 그림 6의 평면형 FSS 구조와 비교해보았을 때, 구형 FSS 구조는 공진주파수가 낮아지고, 통과대역이 좁아지는 경향을 보였다. 따라서 RCS 저감 설계가 요구되는 표적에 적용하고자 하는 입체적인 형상에 따라서 RCS 특성의 변화 경향이 달라질 수 있다는 예측이 가능하다.

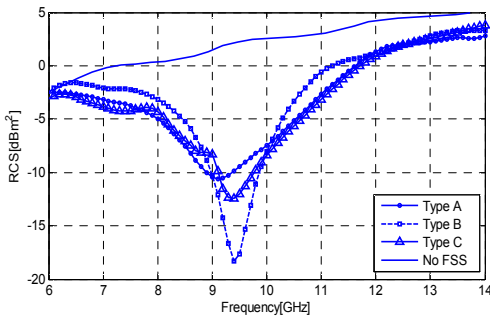


Fig. 8. RCS Comparison results of Spherical FSS with different element arrangement

그림 8. Crossed Dipole Slot FSS의 배열방법에 따른 RCS 특성 변화

IV. 결론

본 논문에서는 RCS를 감소시키기 위한 방법 중 하나인 FSS 설계기술과 관련하여, Crossed Dipole Slot 단위셀을 갖는 유한크기 구형 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 완전도체 금속구에 대한 RCS 특성을 해석하였고 이론값인 Mie Series와 비교하여 일치함을 확인하였다. 제안된 해석방법을 이용하여 FSS 단위셀이 각각 방사형, 원형, 정방형으로 서로 다르게 배열되었을 때 구형 FSS 구조의 RCS 특성변화를 관찰하였다. 본 논문의 결과로부터 구형 FSS 구조의 경우 FSS 단위셀이 정방형으로 배열된 경우 가장 RCS 특성이 우수하게 나타나는 것을 확인하였다.

본 논문의 결과로부터 곡면 형상의 FSS 구조의 설계시 FSS 단위셀의 최적의 배열방법에 대한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다는 사실을 알 수 있으며, 향후 곡면 FSS 구조와 FSS 단위셀의 배열방법에 따

른 해석 연구와 제작을 통한 실험 및 검증이 필요하다고 사료된다.

References

- [1] K. Y. Park, S. E. Lee, C. G. Kim and J. H. Han, "Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures," *Compos. Sci. Technol.* 66, pp. 576-584, 2006
- [2] 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, pp.612-622, May. 1988
- [3] B. Philips, E. A. Parker and R. J. Langley, "Ray Tracing Analysis of Transmission Performance of Curved FSS", *IEE Proc. of Microwaves, Antennas & Prop.*, pp.193-200, 1995
- [4] 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, pp.425-436, 2010
- [5] Stupfel B., and Pion. Y, "Impedance Boundary Conditions for Finite Planar and Curved Frequency Selective Surfaces", *IEEE Trans. on Antennas & Prop.*, Vol. 53, pp.1415-1425, 2005
- [6] Z. Sipus, *Analysis of Curved Frequency Selective Surfaces*, Final Report of EOARD, 2008
- [7] I. M. Ehrenberg, S. E. Sarma and B. I. Wu, "Fully Conformal FSS vis Rapid 3D Prototyping", *2012 IEEE APS International Symposium*, 2012.
- [8] J. H. Lee, K. H. Cho, S. J. Oh, H. Y. Sim, I.S.Seo and K. H. Kim, "Study on Transmission and Reflection Characteristics of Curved Frequency Selective Surface", *2007 Korea Electronics Engineering Society Conference.*, pp.273-274, 2007.
- [9] J. H. Lee, S. J. Oh, I. S. Seo and K. H. Kim, "Measurement method of Curved FSS Screen and Analysis of Frquency Characteristics of Curved FSS Screen", *2007 Korea Electronics Engineering Society Conference.*, pp.271-272, 2007.
- [10] 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
- [11] Walton C. Gibson, *The Method of Moments in*

Electromagnetics, Chapman & Hall/CRC, 2008

[12] E. Topsakal, R. Kindt, K. Sertel 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, Dec. 2001

[13] <http://www.em-hobbies.com>

BIOGRAPHY

IC-PYO, HONG (Member)



1994 : BS Degree in Electronics Engineering, Yonsei University.

1996 : MS Degree in Electronics Engineering, Yonsei University.

2000 : PhD Degree in Electronics Engineering, Yonsei

University.

2003. 3~ Now : Associate Professor, Kongju National University.

<Main interests>

Antenna, Numerical techniques of Electromagnetics

In-Gon. Lee (Student Member)



2012. 3 ~ Now : Senior in Information & Communication Engineering, Kongju National University

<Main Interests>

Antenna Design