

표면 전류를 기반으로 한 유한 배열 I-모양 메타물질의 TM 편파 전자기 산란 모델

Scattering Model of TM Polarized Electromagnetic Wave by Finite I-Shaped Metamaterial Array Based on Surface Current Model

장지웅 · 이해승* · 고일석 · 서일성** · 이용식*

Ji-woong Jang · Haeseung Lee* · Il-suek Koh · Ilsung Seo** · Yongshik Lee*

요 약

일반적으로 메타물질의 성질은 무한히 배열된 단위 셀 구조로 해석한다. 그러나 실제 응용 구조의 설계/구현 과정에서 메타물질은 유한하게 배열할 수밖에 없고, 유한 배열의 효과를 해석하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 유한한 대형 배열 메타물질 구조의 산란 특성을 full-wave 해석 없이 계산하기 위한 방법을 제안하였다. 제안한 모델은 다음과 같다. TM 편파에 대해 유한히 배열한 메타물질 구조의 표면 전류와 무한 배열 표면 전류 비를 4차 다항식으로 근사하였다. 다항식의 계수를 금속 패치의 물리적 길이에 대한 함수로 계산하여, 임의의 I-모양 메타물질이 균일하게 배열된 유한 배열 구조의 전류 분포를 쉽게 계산할 수 있다. 그리고 제안된 전류 분포 모델을 기반으로 예측한 표면 전류를 통해 유한한 메타물질 배열 구조의 산란파를 계산하였다. 또, 제안한 모델을 이용하여 계산한 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section: RCS)을 측정 결과와 비교함으로써 제안한 모델의 정확도를 실험적으로 확인하였다.

Abstract

Generally, the properties of metamaterials are analyzed based on the infinite array of the unit cells. In real application of the metamaterial, however, the array has to be finite. Hence, it is important that a method can analyze the effect of the finite array of the metamaterial. In this paper, a model is proposed which can calculate the scattering by a large-size finite array of an I-shaped metamaterial without a full-wave simulation. The proposed model is based on the surface current estimation of each unit cells. The ratio of the current distribution on a finite array of the metamaterial to that of the infinite array of the same metamaterial for a TM polarized incident wave is approximated as a quartic polynomial. The coefficients of the polynomial are a function of the physical dimension of the metallic patch. Hence, the current distribution of the finite metamaterial can be estimated based on the proposed polynomial and the current of the infinite array. The scattered field is calculated by using the surface current model. The proposed model is numerically and experimentally verified by comparing calculated and measured RCS(Radar Cross Section) data.

Key words: Metamaterials, Finite array, Scattering

인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Inha University)

*연세대학교 전자전기공학과(School of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University)

**국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received January 6, 2014 ; Revised April 11, 2014 ; Accepted April 16, 2014. (ID No. 20140106-003)

· Corresponding Author: Il-suek Koh (e-mail: ikoh@inha.ac.kr)

I. 서론

메타물질(Metamaterials)은 자연계에 존재하지 않는 전자기 특성을 인위적으로 구현한 매질이다^[1]. 메타물질 구조를 구성하는 단위 셀의 금속 구조의 물리적 크기를 변화하여, 메타물질의 전자기 파라미터를 조절할 수 있다. 이러한 성질을 이용하여 전자기파 투명화 장비^{[2],[3]}, 평면형 렌즈^[4] 등의 설계에 메타물질이 사용되고 있다.

메타물질 단위 셀의 전자기 파라미터는 단위 셀이 무한히 배열되어 있다는 가정을 바탕으로 계산한다^[5]. 그러나 실제로 구현되는 메타물질 응용 구조는 유한하므로, 단위 셀의 배열 또한 유한하다. 이에 따라 실제 구현되는 응용 구조의 성능은 무한 배열을 가정한 상태에서 설계한 경우와 차이가 발생한다. 그러므로 이를 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다.

메타물질이 유한히 배열되었을 때 전자기 산란에 미치는 영향은 고려된 바가 있다^{[6],[7]}. 하지만 full-wave 시뮬레이션 결과를 바탕으로 유한한 메타물질 배열을 해석할 경우, 해석할 수 있는 메타물질 단위 셀의 개수는 매우 한정적일 수밖에 없다. 따라서 full-wave 시뮬레이션을 하지 않고 대형 유한 배열 메타물질을 해석할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 표면 전류 모델링을 이용하여 I-모양 메타물질 단위 셀^[3]의 유한 배열 효과를 해석할 수 있는 그림 1과 같은 방법을 제안한다. 제안한 방법은 계산할 수 있는 단위 셀 개수에 한계가 있는 full-wave 시뮬레이션 대신에 간단한 다항식을 사용하여, 거대한 크기를 갖는 유한 배열 메타물질 구조의 전류 분포를 예측할 수 있다.

본 논문의 II장에서는 본 논문에서 고려하는 I-모양 메

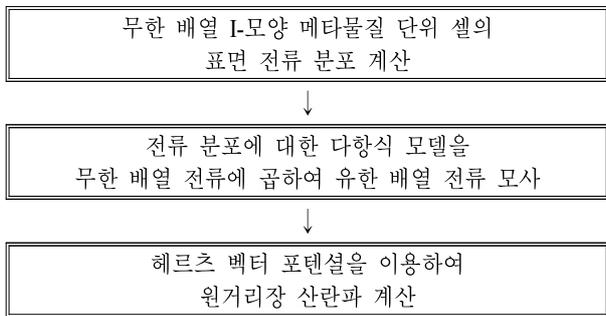


그림 1. 제안한 모델을 모식화한 플로차트
Fig. 1. Flowchart of the proposed model.

타물질을 간략히 소개한다. III장에서는 유한히 배열된 메타물질에 TM 편파의 전자기파가 입사될 경우, 유도되는 표면 전류 분포를 도파관 구조를 이용한 full-wave 시뮬레이션을 이용하여 분석하고, 이를 모델링하는 방법을 제안한다. 또, 제안한 모델링 기법을 적용하여 유한한 메타물질 배열 구조의 원거리장 산란과 방사 패턴을 얻는다. 그리고 IV장에서는 모델링을 통해 얻은 원거리장 산란과 방사 패턴의 정확도를 실험적으로 검증한다.

II. I-모양 메타물질

본 논문에서 사용한 I-모양 메타물질 단위 셀은 0.4 mm 두께의 FR4($\epsilon_r=4.4$) 기판을 이용하여 9 GHz에서 동작하도록 설계하였다. 단위 셀의 금속 패턴과 그 물리적 크기는 그림 2와 같다. 그림 2와 표 1에 표시한 금속 패턴의 물리적 파라미터 중 전자기 파라미터에 가장 큰 영향을 주는 것은 W 이므로 본 논문에서는 나머지 파라미터를 고정한 상태에서 W 를 0.4~2.8 mm의 범위로 변화시켰다.

본 논문에서는 크라머스-크로니히의 관계식(Kramers-Kronig relation)을 기반으로 한 파라미터 추출 기법을 이용하여 I-모양 메타물질의 전자기 파라미터를 계산하였

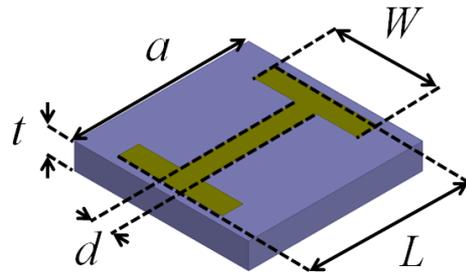


그림 2. I-모양 메타물질 단위 셀의 예시
Fig. 2. Example of I-shaped metamaterial unit cell.

표 1. I-모양 메타물질의 물리적 크기
Table 1. Physical dimensions of I-shaped metamaterial.

| 파라미터 | 길이 (mm) |
|------|---------|
| a | 10/3 |
| t | 0.4 |
| d | 0.4 |
| W | 0.4~2.8 |
| L | 3.0 |

다^[8]. 표 1의 I-모양 메타물질인 경우 W 에 따라 1.47~2.397의 굴절률을 갖는다.

III. TM 편파 표면 전류 모델링

이상적인 메타물질은 무한 배열을 이용하여 계산된 전자기 파라미터가 메타물질 내에서 균질하다고 가정한다. 따라서 이상적인 메타물질의 경우, 배열 내 모든 메타물질 단위 셀에 위치에 따른 위상변화를 제외하면 동일한 표면 전류가 유도되고, 유한히 배열되어 있는 경우 이 전류 분포가 위치에 따라 변하게 된다. 배열이 형성되지 않는 모서리 부분의 전류 분포가 가장 크게 바뀌고, 배열 중간으로 올수록 변화가 적어질 것으로 예측할 수 있다. 또, 배열이 크면 중간 부분의 전류 분포는 무한배열 경우와 유사한 형태를 보일 것으로 예측된다.

그림 3(a)는 본 논문에서 모델링하고자 하는 I-모양 메타물질 단위 셀의 배열을 보여준다. 즉, I-모양 금속 구조의 길이 방향으로는 유한하게, 그와 수직인 방향으로는 무한하게 배열하였다. 입사파는 배열에 수직인 방향으로, 즉, 금속 패턴과 평행한 편파로 입사하는 경우를 고려하였다. 무한 배열의 경우 주기적 경계조건을 이용해서 full-wave 시뮬레이션이 가능하다. 2D 시뮬레이션을 위해 그림 3(b)와 같이 메타물질은 완전 자기 도체(PMC) 경계 조건을 사용하는 TM 편파 도파관내 위치시켜 full-wave 시뮬레이션을 한다. 본 논문에서는 Ansoft사의 HFSS를 이용하여 full-wave 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 30개의 I-모양 단위 셀을 갖는 유한 배열의 전류분포를 무한 배열 전류분포로 정규화한 전류분포 비($J'_d = J_{finite} / J_{infinite}$)를 보여준다. 여기서, J_{finite} 와 $J_{infinite}$ 는 각각 유한 배열에서의 전류와 무한 배열에서의 전류이다. 그림 4에서 30개 유한 배열 구조의 전류 분포는 배열 중간부분에서 약간의 요동과 더불어 양쪽 모서리 셀 부근에서 큰 요동이 발생하면서 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 배열의 끝으로 갈수록 주변 단위 셀과의 상호 결합이 약해지기 때문에 발생한다. 또한, 그림 5를 통해 알 수 있듯이 배열 수를 늘리더라도 배열의 양 끝에서는 같은 쪽의 요동이 발생하며, 앞서 설명한 대로 가운데에서의 요동은 점차적으로 그 폭이 줄어든다.

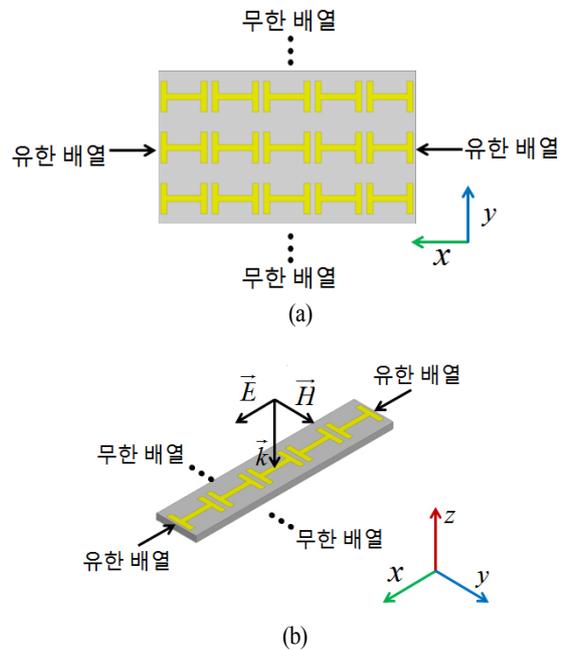


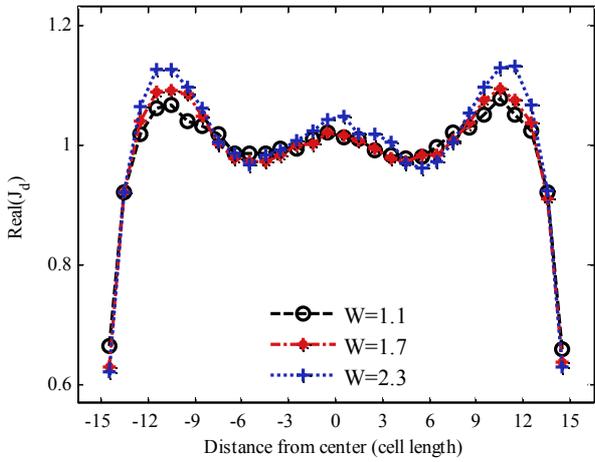
그림 3. 도파관 구조 내 유한한 메타물질 배열
Fig. 3. Finite metamaterial array in waveguide.

본 논문에서 제안하는 유한히 배열된 메타물질의 전류 분포 모델링 과정은 다음과 같다. 우선 무한 배열에서 얻은 전류로 정규화한 유한 배열 구조의 전류 분포에서 배열 중간 부분의 전류 크기는 무한 배열과 같도록, 즉, $J'_d \approx 1$ 로 가정한다. 그리고 전류의 변화가 비교적 크게 나타나는 배열 끝 10개 셀의 전류 분포를 최소자승법을 이용하여 다음과 같이 4차 다항식으로 모델링한다.

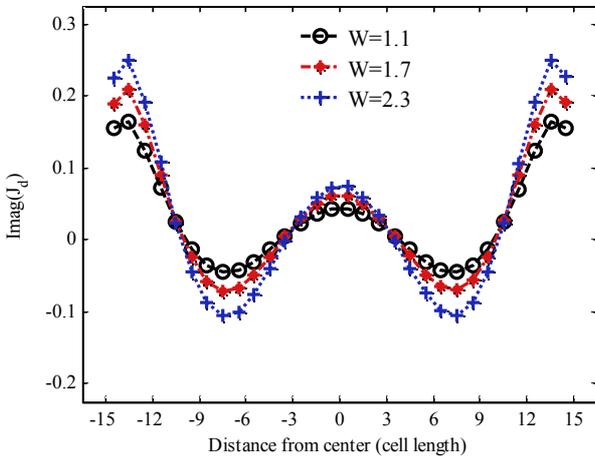
$$J'_d = \sum_{m=0}^4 P_m(W)x^m, \tag{1}$$

$$P_m(W) = \sum_{n=0}^2 Q_{mn} W^n$$

J'_d 의 4차 다항식의 계수 P_m 은 각각 W 에 대한 2차 다항식으로 나타내었다. Q_{mn} 은 P_m 에 대한 2차 다항식의 계수이다. 그림 5에서 알 수 있듯이 J'_d 는 배열 개수와 무관하다. 이는 즉 30개의 유한배열로부터 J'_d 의 계수를 구하면 다른 배열에도 사용이 가능하다는 의미이다. 배열의 구조가 대칭이므로 반대편 끝의 전류 분포 또한 대칭이기 때문에 모델링된 4차 다항식을 대칭적으로 사용이



(a) 전류 밀도의 실수부
(a) Real part of current density distribution

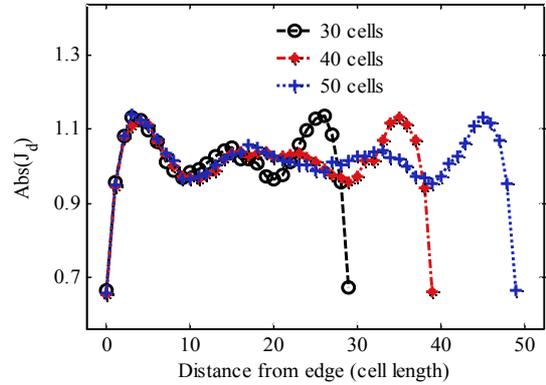


(b) 전류 밀도의 허수부
(b) Imaginary part of current density distribution

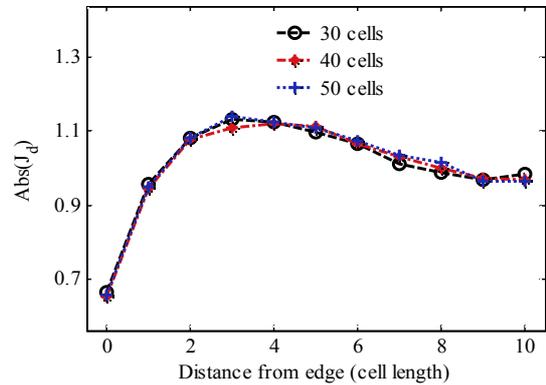
그림 4. 9 GHz 입사파에 대한 TM 도파관 구조 내 30개 I-모양 단위 셀 유한 배열의 표면 전류 밀도
Fig. 4. Surface current density of finite 30 cells in TM polarized waveguide by 9 GHz incident wave.

가능하다.

표 1의 I-모양 단위 셀의 J_d' 의 계수를 표 2에 정리하였다. 그림 6에 이를 full-wave 시뮬레이션으로 얻은 J_d' 와 비교하였다. 크기를 1로 가정한 배열의 중심 부근을 제외하고는 모델링된 다항식과 full-wave 해석 결과가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그러므로 식 (1)과 비교적 적은 계산량으로 계산 가능한 무한 배열 메타물질의 전류 분포



(a) 전체 전류 밀도 분포
(a) Current density distribution of the whole structures



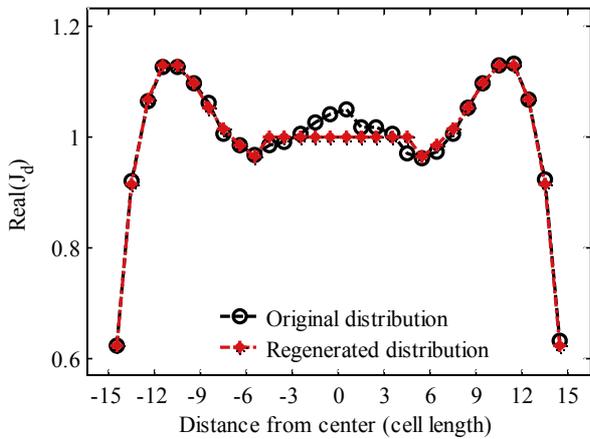
(b) 배열 끝 10개 셀의 전류 밀도
(b) Current density distribution of 10 cells at edge of each structure

그림 5. I-모양 단위 셀의 배열 개수에 따른 전류 밀도 ($W=2.3$ mm)

Fig. 5. Induced current density on finite array of I-shaped metamaterial($W=2.3$ mm).

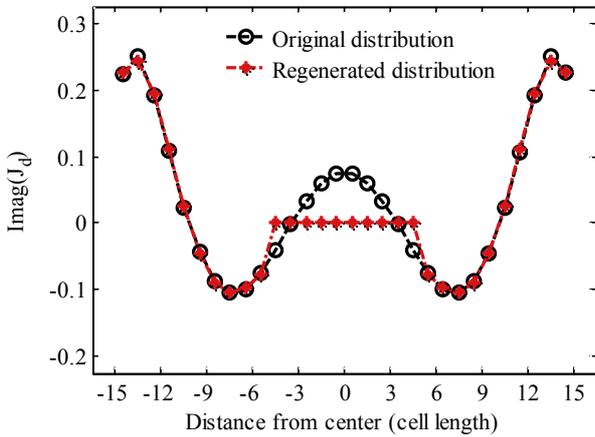
표 2. I-모양 메타물질 유한 배열의 전류 분포 계수
Table 2. Coefficients of current distribution.

| | Q_{m2} | Q_{m1} | Q_{m0} |
|-------|---------------------------|--------------------|--------------------------|
| P_4 | -102.7 +j38.09 | 0.4321 -j0.2432 | -7.378e-04 +j1.05e-05 |
| P_3 | -1.935e+03 +j6.765e+02 | 8.736 -j3.571 | -0.0115 -j0.0002 |
| P_2 | 9.850e+03 -j3.848e+03 | 47.11 -j12.95 | -0.054 -j0.0036 |
| P_1 | -7.624e-03 -j6.477e+03 | 37.02 -j11.24 | -0.06 -j0.0009 |
| P_0 | -1.962e+04 -j8.995e+03 | -80.46 -j6.899 | 1.047 -j0.01338 |



(a) 전류 밀도의 실수부

(a) Real part of current density distribution



(b) 전류 밀도의 허수부

(b) Imaginary part of current density distribution

그림 6. 30개 I-모양 단위 셀 배열의 모델링 및 수치해석적 전류 밀도 분포 비교

Fig. 6. Comparison of modelled and full-wave simulated current density distribution for array of 30 I-shaped metamaterial unit cells.

를 사용하여 임의의 크기를 갖는 유한 배열 메타물질 구조의 전류 분포를 예측할 수 있다.

제안된 방법으로 예측된 유한 배열 메타물질 표면 전류를 이용하여 메타물질의 산란파를 헤르츠 벡터 포텐셜 (Hertz vector potentiation)을 이용하여 계산할 수 있다^{[9],[10]}. 계산한 산란파의 방사 패턴은 그림 8와 같다. 제안한 모델로 계산한 유한 배열 메타물질 배열 구조의 산란파 패

턴이 full-wave 해석 결과와 거의 정확하게 일치함을 알 수 있다. 반면에 전류 분포가 일정한 이상적인 메타물질의 산란파는 유한 배열의 산란파와 극소점에서 특히 큰 차이를 관찰할 수 있으며, 관측점이 grazing angle(90°)에 가까울 경우 차이가 더욱 커짐을 알 수 있다.

IV. 유한 배열 메타물질의 RCS 측정

본 장에서는 제안한 전류 밀도 분포 모델링을 바탕으로 계산한 RCS와 측정을 통해 얻은 RCS를 비교하여 제안한 모델의 정확성을 검증한다. 실험 과정의 모식도는 그림 7과 같다. Anritsu사의 MS4624D vector network analyzer에서 발생된 9 GHz의 신호를 MTG사의 SGH-90 standard horn 안테나를 통해 I-모양 단위 셀 배열에 수직 입사하였다. 입사 신호에 대해 0°로 반사된 산란파는 PORT 1에 연결한 입사 안테나로, 10°~90°로 반사된 산란파는 PORT 2에 연결한 동일한 안테나를 2.5° 간격으로 회전시켜 가며 측정하였다.

일반 실내 환경에서 실험을 진행하였으며, 시간 축 게이팅(time-gating)을 이용하여 주변 환경에 의한 불필요한 산란파를 제거하였다. 측정 시스템의 캘리브레이션(calibration)은 9 GHz에서 크기가 150 mm인 정사각형 구리판에 대해서 MoM 해석 결과를 이용하여 수행하였다.

실험은 배열 크기가 60×30(20 cm×10 cm)과 60×40(20 cm×13.33 cm)인 W=2.0 mm, L=3 mm의 I-모양 단위 셀 배열 구조에 대해서 진행하였다. 그림 8에 RCS 측정 결과와 이론적 결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이 실제 측

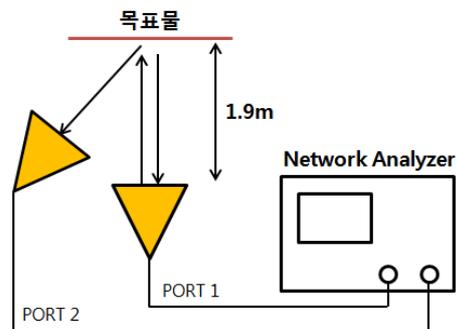


그림 7. RCS 측정 실험 모식도

Fig. 7. Diagram for RCS measurement.

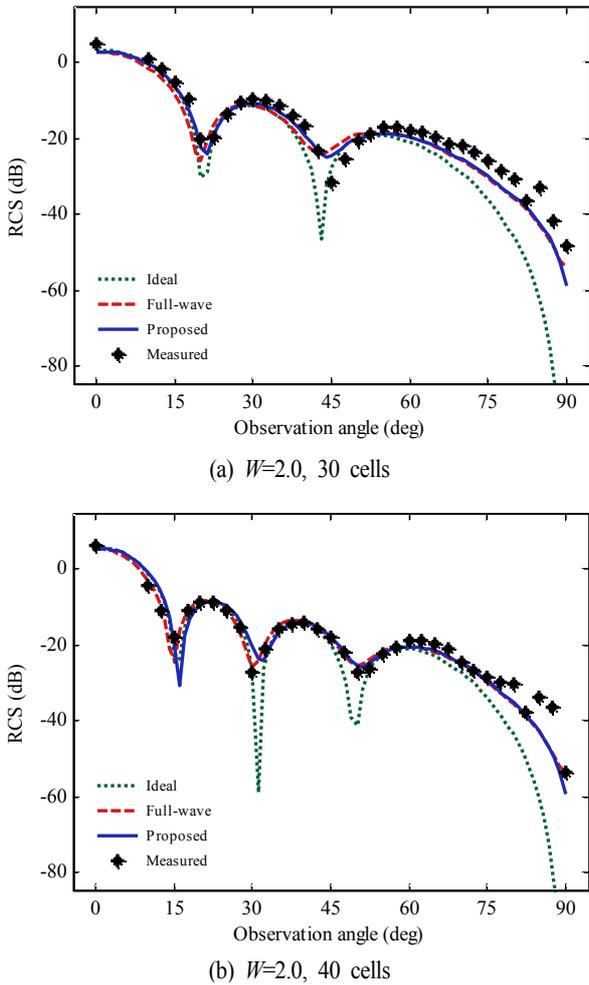


그림 8. 제안한 모델의 수치적 및 실험적 검증
 Fig. 8. Numerical and experimental verification of proposed model.

정 결과는 이상적인 메타물질보다 제안된 모델링 결과를 따르는 것을 확인할 수 있다. 제안된 모델링 결과와 측정 결과는 grazing angle 근처에서 12.7 dB 가량의 오차가 발생하였고, 이상적인 메타물질의 경우와 측정 결과는 31.6 dB 가량의 차이가 발생함을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 기존 무한 배열을 가정한 메타물질 구조 설계의 부정확성을 개선하기 위해 유한 배열 메타물질 구조를 효율적으로 해석할 수 있는 방법을 제안하였

다. I-모양 메타물질 단위 셀이 한쪽 방향으로 유한히 배열된 구조에 대해서 full-wave 시뮬레이션을 통해 표면 전류 분포를 얻고, 이와 무한 배열 메타물질의 전류분포의 비를 기준 셀의 중심으로부터의 위치에 대한 4차 다항식으로 모델링하였다. 다항식의 계수는 전류 분포에 가장 큰 영향을 미치는 I-모양 메타물질 단위 셀 표면의 금속 패턴의 물리적 크기의 함수로 표현하여 다양한 경우에 사용이 가능하다. 특히 유한 배열의 경우, 배열된 개수에 상관없이 전류 분포 변화의 경향성이 유지되므로, 제안된 모델은 다양한 크기의 유한 배열에 적용이 가능하다. 제안된 방법의 효용성을 보이기 위해 유한 배열 메타물질의 RCS를 계산/측정하고, 계산/측정된 RCS를 비교하여 제안된 방법의 정확도를 검증하였다.

References

- [1] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Feb. 1968.
- [2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies". *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977-980, Nov. 2006.
- [3] R. Liu, C. Ji, J. J. Mock, J. Y. Chin, T. J. Cui, and D. R. Smith, "Broadband ground-plane cloak", *Science*, vol. 323, no. 5912, pp. 366-369, Jan. 2009.
- [4] R. Liu, Q. Cheng, J. Y. Chin, J. J. Mock, Tie Jun Cui, and David R. Smith, "Broadband gradient index microwave quasi-optical elements based on non-resonant metamaterials", *Optics Express*, vol. 17, no. 23, pp. 21030-21041, Nov. 2009.
- [5] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markoř, and C. M. Soukoulis, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients", *Physical Review B*, vol. 65, no. 195104, pp. 1-5, Apr. 2002.
- [6] L. L. Hou, J. Y. Chin, X. M. Yang, X. Q. Lin, R. Liu, F. Y. Xu, and T. J. Cui, "Advanced parameter retrievals

for metamaterial slabs using an inhomogeneous model", *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 064904, pp. 1-6 Mar. 2008.

- [7] 장지웅, 김용준, 고일석, 서일성, 이용식 "I-shaped 메타물질 유한배열의 RCS에 대한 영향", 한국전자과학기술 전자과학기술 하계 학술대회, 1(1), p. 55, 2012년 7월.
- [8] Z. Szabo, G. Park, R. Hedge, and E. Li, "A unique extraction of metamaterial parameters based on Kramers

- Kronig relationship", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 10, pp. 2646-2653, Oct. 2010.

- [9] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, pp. 577-595, 1989.
- [10] R. Plonsey, R. E. Collin, *Principles and Applications of Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill Book Company, pp. 528-529, 1961.

장 지 웅



2012년 2월: 인하대학교 전자공학부(공학사)
 2014년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학석사)
 2014년 2월~현재: 인하대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 메타물질, 전자기 수치해석

서 일 성



1986년 2월: 한국과학기술원 기계공학 (공학석사)
 2005년 2월: 한국과학기술원 기계공학 (공학박사)
 1986년 3월~현재: 국방과학연구소
 [주 관심분야] 스텔스 재료

이 해 승



2012년 2월: 연세대학교 전자전기공학과 (공학사)
 2014년 2월: 연세대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 메타물질, 전자기 산란 해석

이 용 식



1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
 2004년 4월: 미국 University of Michigan (공학박사)
 2004년 10월: Post-doctorial Research Associate, Purdue University
 2005년 7월: Senior Research Engineering, EMAG Technologies, Inc.

고 일 석



1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 4월: LG전자 연구원
 2002년 8월: The University of Michigan at Ann Arbor 전기 및 전산과 (공학박사)

2004년 3월~2010년 3월: 인하대학교 정보통신대학원 교수
 2010년 4월~현재: 인하대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] Theoretical Electromagnetics, Numerical Analysis, Channel Modeling

2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수
 [주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나, 메타물질 등