

PBG 구조 성능 해석을 위한 주기경계조건의 FDTD 적용연구

임 계 재*

A Study on the FDTD method using Periodic Boundary Condition for PBG Performance Analysis

Gye-jae Lim

요 약

PBG 구조의 메타물질 설계시 패턴 형태와 배열 구조에 따른 금지대역(bandgap)을 정확하게 설계하기 어려운 문제가 있다. 본 논문에서는 2차원 배열구조로 어떤 모양의 패턴에 대해서도 빠르고 정확하게 원하는 금지대역을 설계할 수 있는 방법을 제안한다. 2차원 평면상의 메타물질 구조는 주기배열로 이루어져 있기 때문에 FDTD 수치해석 방법에 주기경계조건을 부여함으로써 계산영역을 줄였다. 또한 각 패턴이 갖는 L, C 값을 2차원적으로 고려하여 계산하였기 때문에 보다 정확한 설계가 가능하였다. 5GHz 대역에서 정사각형 패턴을 갖는 메타물질을 설계하여 기존의 마이크로스트립 선로를 이용한 1차원 메타물질 해석 값과 비교하였을 때 정확도가 평균적으로 14.7% 향상됨을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

It is difficult to design accurately the bandgap of metamaterial depending on metamaterial pattern and array configuration. In this paper, we propose a design method for the wanted bandgap frequency using any metamaterial pattern in 2 dimensional array. Metamaterial structure is consisted of periodic array. Therefore the calculation area in FDTD(finite difference time domain) method can be reduced by applying the periodic boundary condition to 2-D metamaterial array. The method for design and calculation the L and C values by using 2-D is also considered. So it can be designed more accurately and rapidly. For example, we designed metamaterial square pattern array in 5 GHz, and compared with the 1-D metamaterial pattern using analysis method in microstrip line. As a result, we found that the accuracy of this proposed method can be increased to 14.7%.

keywords : PBG, metamaterial, FDTD, Forbidden Frequency Band, Periodic boundary Condition

* 교신저자 관동대학교 전자정보통신공학부 (gjlim@kd.ac.kr)

접수일자 : 2010년 5월 7일, 수정일자 : 2010년 5월 18일, 심사완료일자 : 2010년 6월 11일

1. 서 론

Victor Veselago는 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 갖는 가상적인 물질을 상정하여 메타물질 PBG (Photonic Bandgap)의 전자기적 성질을 최초로 규명하였다. Doppler shift 효과, Cerenkov 복사, 군속도가 위상속도와 반평행한 군속도 등이 일반물질과는 다르게 반전된다는 것을 이론적으로 규명하였다[1]. PBG의 경우는 슈퍼 렌즈, 평판 렌즈, 완전 렌즈, 고해상도 렌즈, 광도파관 등에 응용 가능성이 있으며, 특히 PBG 구조의 고임피던스 표면(HIS) 패턴은 안테나의 성능개선(고이득, 지향성, 축엽, 후엽, null 억제), 안테나 소형화, 평판화, 휴대폰 전자파 SAR 저감, 전파차단용, 각종 마이크로파 소자에 응용되고 있다.

위와 같은 응용분야에서 PBG 구조의 HIS 패턴을 설계하기 위한 다양한 연구(표. 1)가 이루어져 왔다.

표.1. L, C를 증가시키기 위한 PBG 구조 변화 연구 방법
Table 1. Various methods of research in PBG structures for increasing the L and C value.

a	다층 구조를 사용하여 C를 증대시키는 방법
b	상판의 모양을 변형하여 C를 증대시키는 방법
c	접지면과 만나는 post를 변형하여 L을 증대시키는 방법
d	집중정수 L과 C소자를 부착하여 L, C를 증대시키는 방법
e	상판에 스파이럴을 형성하여 L을 증대시키는 방법
f	1~5의 방법들을 결합시킨 방법

이러한 방법들의 금지대역을 계산하는 방법으로는 해석적 방법과 측정을 통한 방법, 수치해석 방법이 있다. 정사각형 구조의 기본적인 PBG 구조는 이론적으로 L, C를 구하여 공진 주파수 계산을 통해 금지대역을 근사적으로 구할 수 있지만, 다른 구조의 경우에는 해석적으로 L, C를 구하기 어렵다.

이러한 경우에는 측정이나 수치해석 방법을 통해 공진 주파수와 금지대역을 구하여 등가 L, C를 유도하여야 한다[2][3].

그러나 측정의 경우에는는 정확한 감쇠레벨의 측정이 어렵고 송수신용 모노폴 안테나를 광대역상에서 이용하기가 어렵다. 수치해석의 경우에는 1차원 배열로 해석하고 이를 실제로 2차원 배열구조로 적용하였을 때 금지대역이 변화하기 때문에 정확한 금지대역의 설계가 어려워진다.

이를 보완하기 위하여 좌우로 무한 주기배열로 구성된 HIS를 무한 평행평판 사이에 배치하여 TE 모드의 전파가 가능하게 한 후 좌우에 주기경계 조건이 적용된 무한평행평판에 단위 cell들을 배열시키고 해석하여 계산영역을 좁혀 메모리와 시간을 줄일 수 있었다. 이 제안 방법을 사용하면 여러 모양의 실제 2차원 PBG 배열에 대한 정확한 설계가 가능하다.

2. 본 론

2-1 HIS

금속판에 어떤 가공을 적용하면, 이 표면 임피던스를 변화시키는 것이 가능하며. 이로 인해 발생하는 표면파의 특성도 변하게 된다. 일반적으로 임피던스 표면상에서의 표면파는 경계로부터 멀어짐에 따라 지수함수적으로 감쇠한다. 이 경계라고 하는 것은, 이 표면 임피던스에 의해 특징지워진다. 유도성 표면에서는 TM파가 발생하고 이때 표면 임피던스는 다음 식으로 표현된다[4].

$$Z_s(TM) = \frac{j\alpha}{\omega\epsilon} \quad (1)$$

다음에, 용량성 표면에서는 TE 파가 발생하고 이때 표면 임피던스는 다음식으로 표현된다.

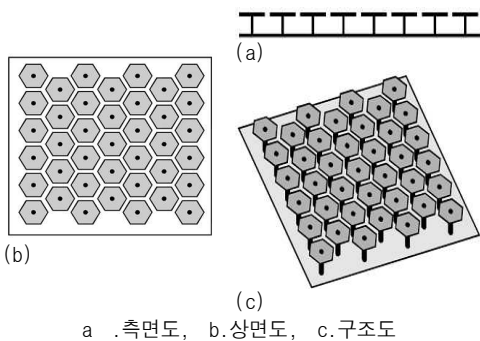
$$Z_s(TE) = \frac{-j\omega\mu}{\alpha} \quad (2)$$

가공된 금속판의 표면 임피던스는 등가 병렬공

진 LC 회로에 의해 특성화되며, 저주파에서는 유도성으로 되어 TM 파를 발생시키고, 고주파에서는 용량성으로 되어 TE 파를 발생시킨다. LC 공진주파수 근방에서는 표면 임피던스가 특히 높아진다. 이 대역에서 전파는 표면을 전파하지 않고 금지대역으로 동작하게 된다.

고임피던스의 표면을 설명하면 그림 1과 같이 평면 금속판 상의 금속 돌기의 예로 구성되어 있으며, 육각형상의 삼각격자의 중심에 정렬되어 있고, 표면으로부터 돌출된 모양으로 되어 있다. 이 돌기는 판 상면에 금속의 접촉점을 가지고 있고, 금속 via를 통해 도전성이 낮은 표면에 연결되어 있다.

이 돌기가 사용되는 파장에 비해 작으면, 여기서의 전자파 특성은 집중회로소자로 설명된다. 이것들은 병렬공진 L, C 회로와 같은 역할을 하게 되어, 표면전류를 막는 전기적 필터로 동작한다. 높은 주파수 영역에서는 표면 임피던스가 특별히 높아 표면에 연한 전계가 커져도 접선 방향의 자계는 작게 된다. 고임피던스 표면은 주파수에 따라 반사 위상이 $\pi[rad]$ 부터 $-\pi[rad]$ 의 범위에서 연속적으로 변화하는 것으로 복사소자를 이 표면 가까이에 직접 배치하는 것이 가능하다. 이로 인한 표면파의 억제 가능하기 때문에 금지대역이 형성된다[5,6].



a. 측면도, b. 상면도, c. 구조도

그림1. 고임피던스 표면의 구조.
Fig 1. The structure of HIS.

2-2. HIS 구조의 성능 분석 방법

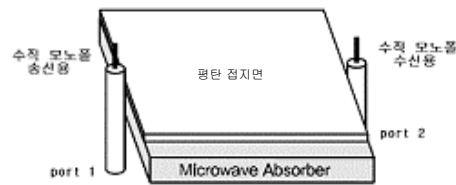
HIS의 응용 가능성에 따라 많은 연구가 활발히

진행되어 왔다. 다양한 모양과 구조의 HIS 성능 연구에서 주 연구목표는 보다 소형이며, 얇은 구조로 보다 낮은 주파수대역에서 금지대역을 설계하는 것이다. 이를 위해서는 식 (3)에서 L과 C 값을 증가시킬 필요가 있기 때문에 돌기 및 via의 형상을 표 1과 같이 다양하게 변화시켜 설계하고 있다.

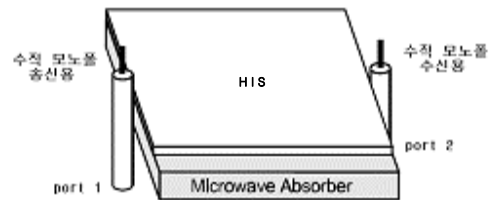
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

그러나 설계시 정확한 L, C 값을 구하기 어렵기 때문에 추정[6]이나 수치해석 방법을 이용하고 있다. 먼저 추정을 이용하여 금지대역을 구하기 위해서는 일반적으로 2단계 추정으로 이루어진다.

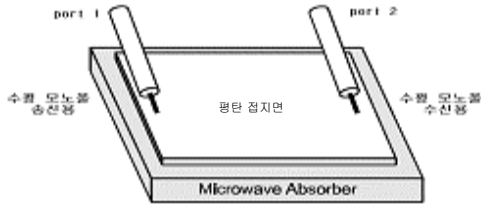
그림 2와 같이 제작된 일정크기의 평면 접지판과 HIS 구조의 양쪽 끝에 수직/수평 편파를 송신하고 수신하는 모노폴 안테나를 배치하여, 송신부를 port 1로, 수신부를 port 2로 두고 각 편파에 따른 S11과 S21을 측정한다.



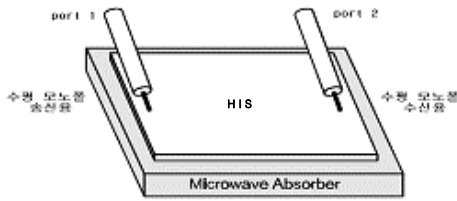
<평탄 접지면에서의 수직편파 TM mode 측정>



<HIS 구조면에서의 수직편파 TM mode 측정>



<평탄 접지면에서의 수평직편파 TE mode 측정>



<HIS 구조면에서의 수평직편파 TE mode 측정>

그림2. 송,수신 안테나를 이용한 HIS 구조 금지대역 측정.
Fig 2. The HIS bandgap measurement using Tx and Rx Antennas.

이 방법은 두 번의 동일한 조건 하에 정밀한 측정이 요구되고, 측정된 값들을 비교 분석하여야 하는 불편함이 있으며, 정확한 감쇠 레벨의 측정이 어려우며, 또한 설계한 HIS 구조의 차단대역을 예측할 수 없는 경우에 송신 및 수신으로 사용하는 모노폴 안테나의 동작 대역을 일치시키기 어렵다는 문제점 있다.

다음은 마이크로스트립 선로의 TEM모드 전파 측정을 이용하기 위해 마이크로스트립 선로 공간에 HIS 패턴을 삽입하여 차단특성을 해석하고 측정하는 방법이다. 그림 3과 같이 HIS 구조를 주기적 1차원 배열을 만들고 이 위에 TEM 으로 전파되는 마이크로스트립 선로를 배치하여 입력부를 port 1으로 , 출력부를 port 2로 두고, S11과 S21 특성을 측정하여 차단대역과 차단레벨을 구할 수 있다. 이 경우에는 비교적 넓은 주파수 대역의 측정과 해석이 가능하다는 장점이 있다. 또한 일반적으로 마이크로파 회로나 평면구조 안테나 등의 수치 해석 계산영역 정도밖에 되지 않기 때문에 빠른 시

플레이션이 가능하다.

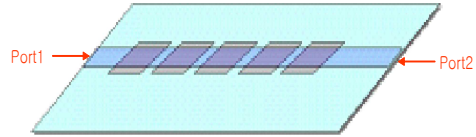


그림3. 마이크로스트립 선로의 TEM파를 이용한 HIS 구조 1차원 배열의 금지대역 측정 방법.
Fig 3. The HIS bandgap measurement using TEM mode in microstrip line.

그러나 HIS 구조는 일반적으로 1차원 배열이 아닌 2차원 배열로 구성되어 있기 때문에 이 방법으로는 실제와 L, C 값이 다르기 때문에 금지대역의 차이가 발생한다. 즉, 1차원 배열을 마이크로스트립 선로 상에서 측정하여 설계한 HIS 구조는 실제 적용을 위해 2차원 배열로 제작하였을 때, 금지대역의 차이를 보이게 되어 정확한 금지대역의 설계가 어려워진다.

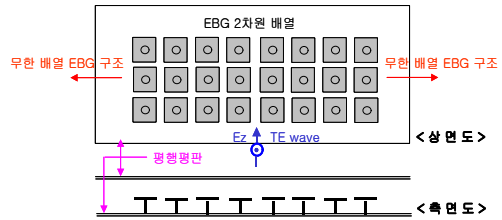


그림4. 무한 평행평판 하에 배열된 2차원 HIS 구조.
Fig 4. The 2D HIS construction in the infinite parallel plates.

이 문제점을 해결하기 위하여 그림 4와 같이 좌우로 무한 주기배열로 구성된 HIS를 무한 평행평판 사이에 배치하게 되면 TE모드의 전파가 가능하게 된다. 이 구조는 그림 5와 같이 좌우에 주기경계조건이 적용된 단위 cell들의 배열로 볼 수 있다. 따라서 이 단위 cell 하나를 해석하게 되면 FDTD 방법을 이용하여 각종 HIS 구조에 대해 TE 모드를 여기시키는 상황을 시뮬레이션하여 금지대역과 감쇠 레벨을 분석하고 최소 크기를 갖는 최적 HIS 구조의 설계를 수행할 수 있다. 이와 같이 평행평판

TE 모드 여기 구조에 주기경계 조건을 부여한 개선된 방법을 사용함으로써 계산영역이 극히 좁아져 계산 메모리와 시간이 절약되고, 여러 가지 모양의 실제 2차원 HIS 배열에 대한 정확한 설계가 가능하다.

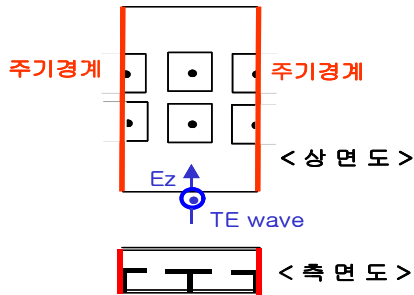


그림5. 주기경계조건을 이용한 무한 평행평판 구조 하의 HIS 구조 시뮬레이션 방법 제안.
Fig 5. Application of periodic bandgap condition in proposed 2D HIS structure.

2-3. HIS 1D 와 2D의 성능 해석 비교

기본적인 정사각형 돌기형태 HIS 구조를 설계하여 파라미터 변화에 대한 금지대역의 전기적인 특성을 분석한 결과와 주기경계조건 구조를 이용한 분석 결과를 비교 하였다.

일반적인 돌기 형태 HIS 구조의 설계에서 파라미터의 변화에 대한 특성분석을 위해 유전율 $\epsilon_r=2.5$ 인 기판상에서의 마이크로스트립 전송선로를 설계하였고 돌기의 수 $N=7$ 로 하였다. HIS 구조 cell의 정사각형 돌기의 크기 $P_w = 6\text{mm}$, 이웃한 HIS의 간격은 $P_s = 1.2\text{mm}$ 이며 via의 반경(V_r)과 높이(V_h)는 각각 0.25mm 와 0.8mm 로 설계하였다.

주기경계조건을 적용한 HIS 구조에서는 무한 평행평판 구조를 가지기 때문에 접지면과 상판의 크기의 파라미터는 동일하게 했다. 정사각형 돌기와 via의 파라미터 변화는 마이크로스트립 전송선로의 설계와 동일한 조건으로 하였다.

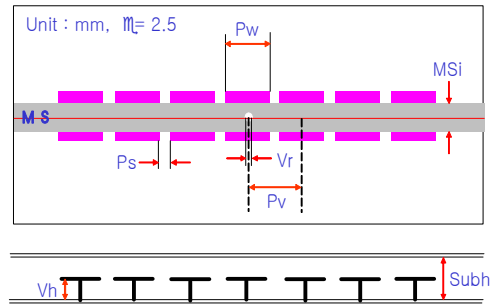


그림6. Plate의 기본 격자구조와 PBG 구조의 1차원 배열 ($N=7$).
Fig 6. The 1D HIS structure.
 $P_w(P_l)=6$, $P_s=1.2$, $P_v=6.3$, $V_h=0.8$, $P_h=0.1$,
 $V_r=0.25$, $MSi=4$ (단위:mm)

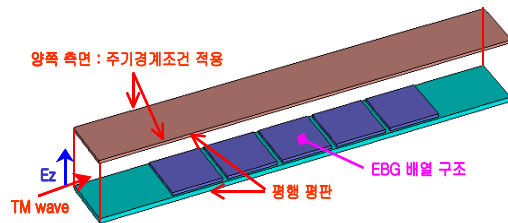


그림7. HIS 구조의 2차원 배열을 주기경계로 간략화.
Fig 7. The 2D HIS structure model using periodic bandgap condition.
 $P_w(P_l)=6$, $P_s=1.2$, $P_v=6.3$, $V_h=0.8$, $P_h=0.1$,
 $V_r=0.25$ (단위:mm)

HIS 구조의 마이크로스트립 전송선로를 이용한 1D 배열 모형과 주기경계조건을 이용한 2D 배열 모형을 설계하여 그림. 8, 그림. 9와 같은 S_{11} , S_{21} 파라미터 결과값을 얻었다. P_w (plate 크기) 변수를 변화하여 1D 모형과 2D 모형의 -20dB 에서의 금지대역 중심주파수와 대역폭을 비교 분석하기 위해 변화에 따른 결과 값을 그림. 10, 그림. 11과 같은 그래프로 나타내었다.

금지대역 중심주파수에서의 결과 값은 1D 모형에서는 최대 값과 최소 값이 $P_w=3$ 일때 10GHz , $P_w=7$ 일때 5.11GHz 이었고, 2D 모형에서의 최대 값과 최소 값은 동일한 P_w 값에서 11.87GHz 5.72GHz 이었다. 1D 값과 2D 값을 비교 분석하였을 때 최대 값에서 18.7% , 최소 값에서 11.94% 의 오차를 보였다.

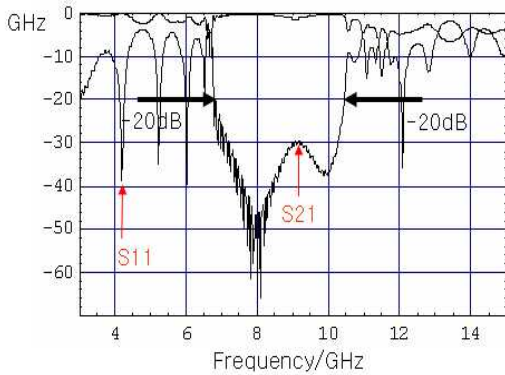


그림8. 마이크로스트립 전송선로를 이용한 1D 배열 모형의 S11, S21 파라미터.
Fig 8. S11 and S21 of 1D HIS model.

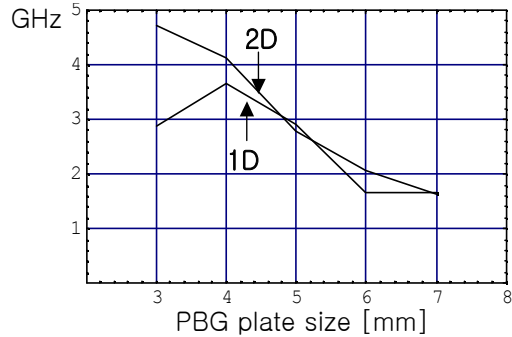


그림11. Pw(plate 크기)에 따른 1D, 2D의 금지대역폭의 변화.
Fig 11. The variation of bandgap width depending on Pw.

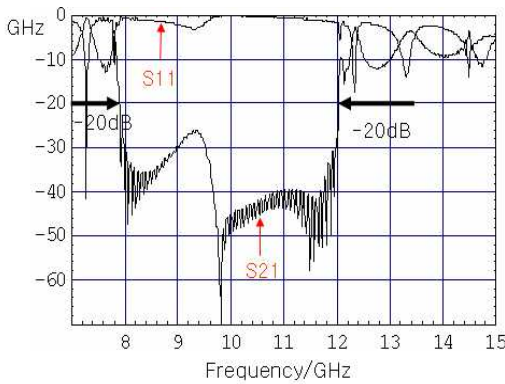


그림9. 주기경계조건을 이용한 2D 배열 모형의 S11, S21 파라미터.
Fig 9. S11 and S21 of 2D HIS model.

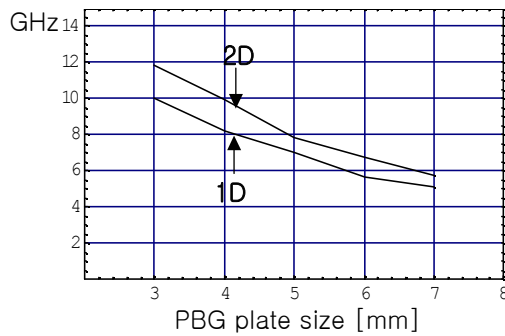


그림10. Pw(plate 크기)에 따른 1D, 2D의 금지대역 중심주파수의 변화.
Fig 10. The variation of bandgap center frequency depending on Pw.

금지대역폭에서는 1D의 최대 값은 Pw=4일때 3.66GHz, 최소 값은 Pw=7일때 1.66GHz 이었고, 2D의 최대 값은 Pw=3일때 4.72GHz, Pw일때 1.66GHz 이었다. 1D 값과 2D 값의 비교 분석에서는 최대 값에서 28.96%, 최소 값에서 2.41%의 오차를 보였다.

마이크로스트립 전송선로를 이용한 1D 배열 모형과 주기경계조건을 이용한 2D 배열 모형의 Ps(plate 사이의 간격)의 변화에 따른 비교 분석을 위해 Pw=4를 기준으로 하였다. 1D와 2D의 Ps에 따른 S11, S21 파라미터는 그림. 12와 그림. 13에 나타내었고, Pw의 비교 분석과 동일한 방법으로 Ps 변화에 따른 -20dB에서의 금지대역 중심주파수와 대역폭을 그림. 14와 그림. 15에 나타내었다.

금지대역 중심주파수에서 1D는 최대 값이 Ps=1.0일때 8.69GHz, 최소 값이 Ps=1.4일때 8.49GHz 이었고, 2D는 동일한 Ps 값에서 최대 값 10.19GHz, 최소 값 9.75GHz 이었다. 비교 분석했을 때 오차는 최대 값에서 17.26% 최소 값에서 14.84%의 오차를 보였다.

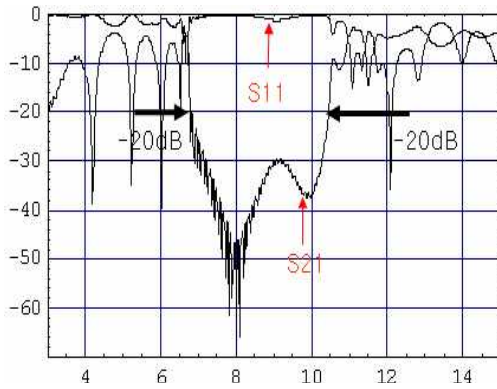


그림12. 마이크로스티립 전송선로를 이용한 1D 배열 모형의 S11, S21 파라미터.
Fig 12. S11 and S21 of 1D HIS model.

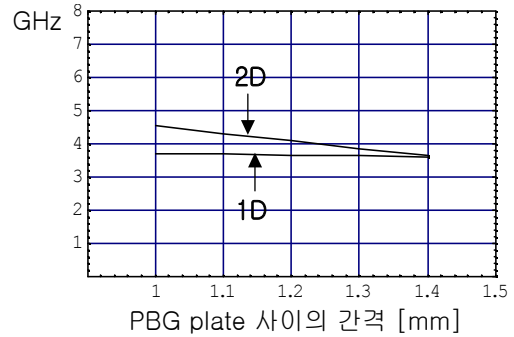


그림15. Ps(plate 사이의 간격)에 따른 1D, 2D의 금지대역폭의 변화.
Fig 15. The variation of bandgap width depending on Ps.

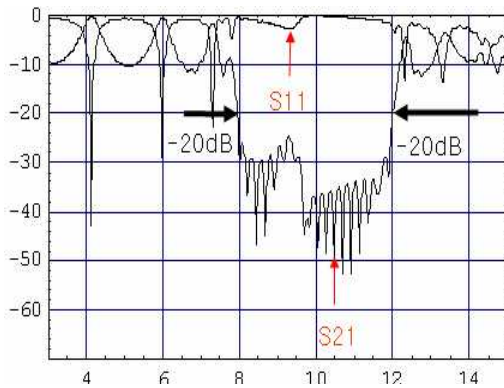


그림13. 주기경계조건을 이용한 2D 배열 모형의 S11, S21 파라미터.
Fig 13. S11 and S21 of 2D HIS model.

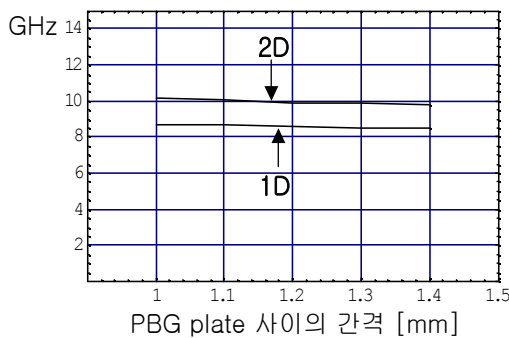


그림14. Ps(plate 사이의 간격)에 따른 1D, 2D의 금지대역 중심주파수의 변화.
Fig 14. The variation of bandgap center frequency depending on Ps.

금지대역폭의 최대값과 최소값은 금지대역 중심 주파수에서의 Ps 변수 값과 동일하였다. 1D의 경우 최대 값과 최소 값은 3.72GHz, 3.6GHz 이었고, 2D의 경우 최대 값과 최소 값은 4.56GHz, 3.64GHz 이었다. 비교 분석했을 때 오차는 최대 값에서 22.58% 최소 값에서 1.11%의 오차를 보였다.

III. 결 론

본 논문에서는 기존의 HIS 구조의 설계에서 시뮬레이션 데이터와 측정 데이터의 오차 범위를 좁히고 수치해석 시간의 단축과 데이터량의 최소화를 위해 FDTD 방법에 주기경계조건을 부여하는 방법에 대하여 제안하였다. HIS 구조의 마이크로스티립 선로를 이용한 1D 배열 모형의 결과 값과 주기경계조건을 적용한 2D 배열 모형의 결과 값의 오차는 평균적으로 14.72% 향상됨을 확인하였다. 주기경계조건 적용 시 설계 오차를 개선 할 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 주기경계조건에 대한 제안은 앞으로 PBG 응용분야의 개발에 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Vesalago, V.G., "The Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Sov. Phys. Usp., 10-4, pp. 509-514, 1968.
- [2] R.F., J.Broas, D.F.Sievenpiper, and E.Yablonovitch, "A High-Impedance Ground Plane Applied to a Cell phone Handset Geometry", IEEE Trans. Microwave Theory Tech, Vol. 49, pp.1262-1265, Jul. 2001.
- [3] R.Collin, "Field Theory of Guided Waves", 2nd ed. New York:IEEE pRESS, 1991.
- [4] D. Sievenpiper, L.Zhang, R.F.J. Broas, N.G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 47, No. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- [5] Christophe Caloz, Tatsuo Itoh., "Electromagnetic metamaterials : transmission line theory and microwave applications", Wiley-Inter science publication, 2006.
- [6] Amir Aminian, Fan Yang, and Yahya Rahmat-Samii, "Bandwidth Determination for Soft and Hard Ground Planes by Spectral FDTD: A Unified Approach in Visible and Surface Wave Regions", IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 53, NO. 1, pp. 18-28, JANUARY 2005.

저자약력

林 桂 在

정희원



동국대학교 전자공학과(공학사)
동국대학교 대학원 전자공학과
(공학석사, 공학박사)
현재 관동대학교 전자정보통신
공학부 정보통신공학전공 교수