

논문 2008-45TC-8-9

# 주기 구조 Metamaterial의 유효 유전율과 투자율 추출

## (Extraction of Effective Permittivity and Permeability of Periodic Metamaterial Cells)

이동현\*, 박위상\*\*

(Dong Hyun Lee and Wee Sang Park)

## 요약

구형 도파관 기법을 이용하여 다양한 모양을 가진 주기적인 metamaterial (MTM) 셀의 복소 유전율과 투자율을 시뮬레이션으로 추출하였다. 이 도파관은 PEC 벽과 PMC 벽으로 구성된 가상적인 것이고, 고려된 MTM 셀의 모양은 thin wire (TW), single split-ring resonator (SSRR), double SRR (DSRR), modified SRR, 그리고 TW와 DSRR이 결합된 구조이다. TW는 음의 유전율/양의 투자율, SRR은 양의 유전율/음의 투자율, 그리고 TW와 DSRR을 합친 구조는 유전율과 투자율이 동시에 음이 되는 영역이 나타남을 확인하였다. 각 셀의 파라미터에 따른 유전율과 투자율의 변화를 살펴보았다. 추가적인 연구로서 상기 도파관 기법의 단점을 보완하는 시 영역 신호를 이용한 추출 방법을 소개했다.

## Abstract

The complex permittivity and permeability of various periodic metamaterial (MTM) cells are extracted by simulating a fictitious rectangular waveguide consisting of PEC and PMC walls. The shapes of the MTM cells include a thin wire (TW), a single split-ring resonator (SSRR), a double SRR (DSRR), a modified SRR, and a combined structure of the TW and the DSRR. The TW falls on a negative- $\epsilon$ /positive- $\mu$  region, the SRRs on a positive- $\epsilon$ /negative- $\mu$  region, and the combined structure on a negative- $\epsilon$ /negative- $\mu$  region. We also investigate how the permittivity and permeability are affected by the dimension parameters of the MTM cells. Another extraction technique utilizing time domain signals is developed overcoming some limitations that the waveguide technique can not handle.

**Keywords :** Constitutive Parameter Extraction, Metamaterial Cells, Thin Wire, SRR

## 1. 서론

Metamaterial(MTM)은 넓은 의미로 자연계에 존재하지 않는 전자기적 특성을 가지는 인공적인 유효 동일 물질로 정의된다. 유효 동일 물질은 구조의 주기가 가이드 파장(guide wavelength)보다 훨씬 작을 때를 의미하며, 일반적으로 그 기준은 평균 단위 셀의 크기가 파장의 4배보다 작을 때를 지칭한다<sup>[1]</sup>. 만일 평균 단위 셀의 크기가 파장의 4배보다 작으면, 전파는 흩

어짐(scattering)이나 회절(diffraction)보다는 굴절(refraction)에 영향을 주로 받는다. 이러한 조건에서 물질의 전자기적 특성은 구조 (constitutive) 파라미터인 유전율( $\epsilon$ )과 투자율( $\mu$ )에 의해 결정된다. 따라서 MTM의 전자기적 특성을 예측하기 위해서 주어진 MTM의 구조 파라미터를 예측하는 것이 중요하다. 최근 5년 사이에 MTM의 유전율과 투자율을 예측하는 방법이 다수 보고되고 있는데, 대부분 물질의 반사 및 투과 계수로부터 유전율과 투자율을 추출한다<sup>[2-5]</sup>. 물질의 유전율과 투자율을 추출하는 방법은 MTM이 관심 받기 시작하던 그 이전에도 존재했다<sup>[6]</sup>. 이 방법<sup>[6]</sup>은 동축 케이블 안에 측정하고자 하는 시료를 넣고, 반사 및 투과 계수로부터 유전율과 투자율을 추출한다. 최근 발표된 MTM의 구조 파라미터를 추출하는

\* 학생회원, \*\* 정회원 포항공과대학교

(Pohang University of Science and Technology)

\* 본 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-612-D0069)

접수일자: 2008년7월20일, 수정완료일: 2008년8월1일

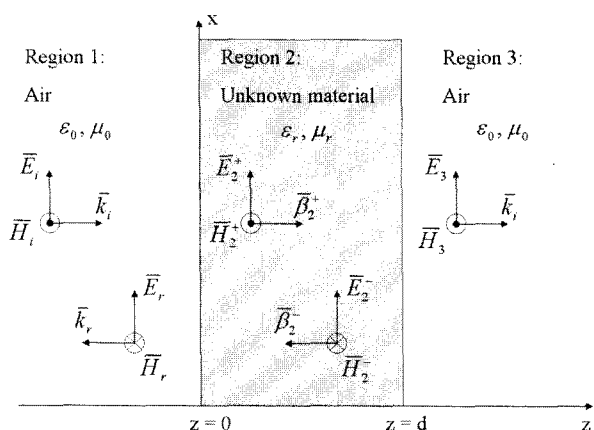


그림 1. 다층 물질에 TEM wave의 입사 시의 전자계 field distribution.

Fig. 1. Electric-magnetic field distribution in multiple dielectric materials for TEM wave incident.

방법과 유사하나 추출 시 사용하는 수식의 모호함 (ambiguity)이 적다.

본 논문에서는 참고 문헌<sup>[6]</sup>에서 유도된 수식을 리뷰 하고, 이 방법으로 대표적인 MTM의 구조 파라미터를 추출하고 그 특징을 분석한다. 또한 시 영역 신호를 이용하여 구조 파라미터를 추출하는 방법을 살펴보고 이 방법을 검증한다.

## II. Transverse electromagnetic (TEM) wave 입사 시 매질의 구조 파라미터 추출

그림 1은 유전율과 투자율 정보를 모르는 unknown material이 삽입된 구조에 TEM wave가 입사할 때의 전계, 자계, 그리고 전파의 진행 방향을 보여준다. 첫 번째와 세 번째 층은 자유공간이며, 중간층은 두께가 d인 unknown material이다. 각 영역에서 전계 및 자계는 다음과 같이 표현된다.

영역 1

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= \hat{x}E_{i0}e^{-jk_0z} + \hat{x}E_{r0}e^{jk_0z} \\ \bar{H}_1 &= \hat{y}\frac{E_{i0}}{\eta_0}e^{-jk_0z} - \hat{y}\frac{E_{r0}}{\eta_0}e^{jk_0z} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ ,  $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$  이다.

영역 2

$$\begin{aligned} \bar{E}_2 &= \hat{x}E_2^+e^{-j\beta_2z} + \hat{x}E_2^-e^{j\beta_2z} \\ \bar{H}_2 &= \hat{y}\frac{E_2^+}{\eta_2}e^{-j\beta_2z} - \hat{y}\frac{E_2^-}{\eta_2}e^{j\beta_2z} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\beta_2 = \omega\sqrt{\epsilon_2\mu_2} = \omega\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r} = k_0\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ ,  $\eta_2 = \sqrt{\mu_0\mu_r/\epsilon_0\epsilon_r} = \eta_0\sqrt{\mu_r/\epsilon_r}$  이다.

영역 3

$$\begin{aligned} \bar{E}_3 &= \hat{x}E_3e^{-jk_0z} \\ \bar{H}_3 &= \hat{y}\frac{E_3}{\eta_0}e^{-jk_0z} \end{aligned} \quad (3)$$

상기의 수식에  $z = 0$ 과  $z = d$ 에서 전계와 자계의 경계 조건을 적용하여 unknown material에서의 반사계수와 투과계수를 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Gamma = S_{11} &= \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{(1-z^2)\Gamma_{12}}{1-\Gamma_{12}^2z^2} \\ T = S_{21} &= \frac{E_2^+}{E_{i0}} = \frac{(1-\Gamma_{12}^+)z}{1-\Gamma_{12}^2z^2} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$$\Gamma_{12} = \frac{\eta_2 - \eta_0}{\eta_2 + \eta_0} = \frac{\sqrt{\mu_r}/\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\mu_r}/\sqrt{\epsilon_r} + 1} \quad (5)$$

$$z = e^{-j\beta_2d} = e^{-j(\omega/c_0)\sqrt{\mu_r\epsilon_r}d} \quad (6)$$

이다.

식 (4)를 정리하여 다음의 수식을 유도할 수 있다.

$$S_{11}\Gamma_{12}^2 - \Gamma_{12}|1 - (S_{21}^2 - S_{11}^2)| + S_{11} = 0 \quad (7)$$

$$z = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma_{12}}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma_{12}} \quad (8)$$

식 (7)의 해를 구하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Gamma_{12} &= \frac{1 - (S_{21}^2 - S_{11}^2)}{2S_{11}} \pm \sqrt{\left[\frac{1 - (S_{21}^2 - S_{11}^2)}{2S_{11}}\right]^2 - 1} \\ &= X \pm \sqrt{X^2 - 1} \end{aligned} \quad (9)$$

(5)와 (9)을 연립하여 아래의 수식을 얻을 수 있다.

$$X = \frac{\sqrt{\mu_r}}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1 + \Gamma_{12}}{1 - \Gamma_{12}} \quad (10)$$

(6)과 (8)를 연립하여 아래의 수식을 얻을 수 있다.

$$Y = \sqrt{\mu_r\epsilon_r} = j\frac{c_0}{dw} [\ln|z| + j\arg(z)] \quad (11)$$

(10)과 (11)을 이용하여 유전율과 투자율을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \epsilon_{r,real} - j\epsilon_{r,imag} = X/Y \\ \mu_r &= \mu_{r,real} - j\mu_{r,imag} = XY \end{aligned} \tag{12}$$

따라서 unknown material 표면에서  $\Gamma(S_{11})$ 와  $T(S_{21})$ 을 얻은 후 앞의 수식을 통해 이 물질의 유전율과 투자율을 추출할 수 있다.

### III. 가상의 도파관을 이용한 구조 파라미터 추출 및 시뮬레이션 검증

앞 절의 TEM wave가 입사되는 구조는 이상적인 경계 조건인 perfect electric conductor (PEC)와 perfect magnetic conductor (PMC)의 가상의 도파관으로 시뮬레이션 할 수 있다. PEC에서는 tangential 전계가 0이 되고, PMC에서는 tangential 자계가 0이 된다. 이 가상의 도파관의 필드 분포는 TEM wave가 입사하는 무한한 크기의 물질의 필드분포와 동일하다. 따라서 이 가상의 경계조건을 사용함으로써 TEM wave가 진행하는 가상의 도파관을 만들 수 있을 뿐만 아니라, 단위 셀로 무한한 크기의 물질을 시뮬레이션 할 수 있어 빠른 시간 내에 투과 및 반사 계수를 얻을 수 있다.

그림 2는 가상의 도파관 안에 unknown material의 S-parameter를 얻는 시뮬레이션 구조이다. 도파관의 위쪽과 아래쪽 면은 PEC 경계 조건을 사용했으며, 앞쪽과 뒤쪽 면은 PMC 경계 조건을 사용했다. 물질의 가로 세로는 각각  $L_x$ 와  $L_y$ 이고, 두께는  $L_z(d)$ 이다. 시뮬레이

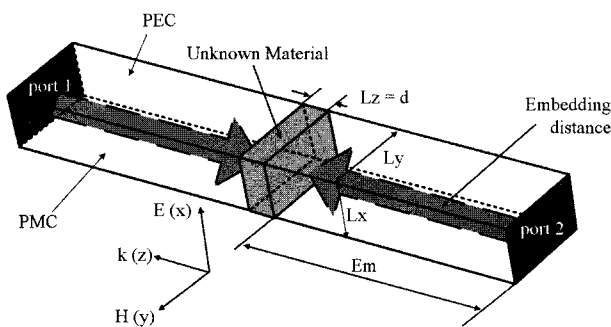
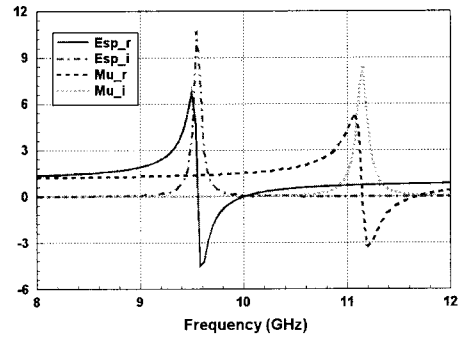
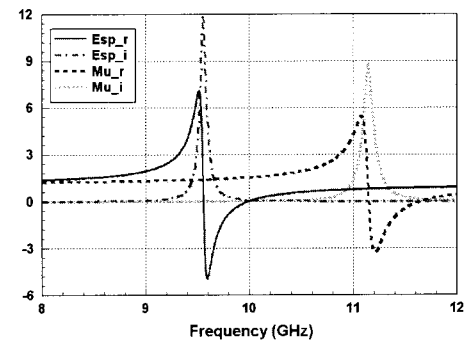


그림 2. 가상 도파관을 이용한 S-parameter를 얻기 위한 시뮬레이션 구조. PEC: Perfect Electric Conductor. PMC: Perfect Magnetic Conductor.

Fig. 2. Simulation structure for S-parameter using a fictitious waveguide.



(a)



(b)

그림 3. Lorentz 모델을 가지는 물질의 추출된 유전율 투자율. (a) 입력 유전율 투자율. (b) 추출된 유전율 투자율.  $L_x = 6$  mm,  $L_y = 10$  mm,  $L_z = 1$  mm

Fig. 3. Extracted permittivity and permeability for a material of Lorentz model.

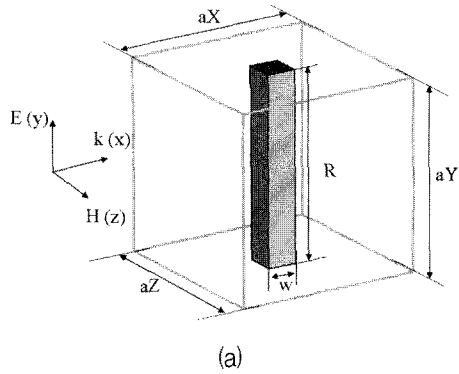
션에서 급전은 waveguide port를 사용했으며, port가 존재하는 위치에서 물질이 존재하는 위치까지 reference 면을 이동시켜( $E_m$ ) 물질의 표면에서의 반사 및 투과 계수를 얻는다. 이 시뮬레이션 구조로부터  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 얻은 후 앞절의 수식을 이용하여 유전율과 투자율을 추출할 수 있다.

이 유전율 투자율 추출 시뮬레이션을 검증하기 위해 Lorentz 모델<sup>[5]</sup>의 물질을 넣고 앞 절에서의 수식을 이용하여 유전율 투자율을 추출했다. 가상의 도파관 시뮬레이션을 위해 사용한 시뮬레이션 툴은 CST사의 MWS ver. 2006b 이다. 그림 3(a)는 물질의 원래 유전율 및 투자율 값이며, 그림 3(b)는 추출한 유전율 및 투자율 값이다. 추출된 유전율 및 투자율이 물질의 유전율 및 투자율과 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

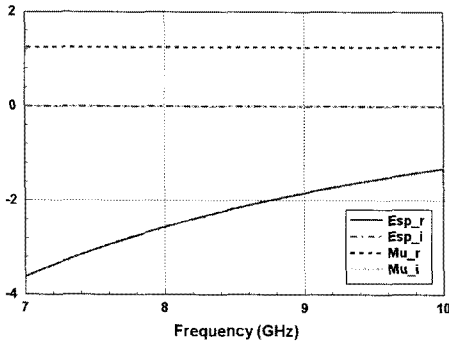
### IV. 다양한 MTM 단위 셀의 구조 파라미터 추출

#### 가. Thin Wire (TW)

주기적으로 배열된 thin wire (TW)는 플라즈마 현상



(a)



(b)

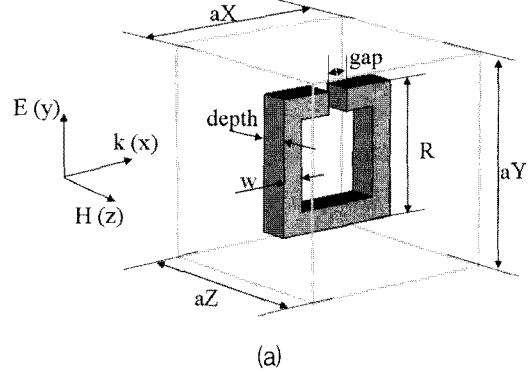
그림 4. (a) TW 시뮬레이션 구조. (b) 추출된 구조 파라미터.  $aX = aY = aZ = 5$ ,  $R = 5$ ,  $w = 0.25$  (mm)  
Fig. 4. (a) TW simulation structure. (b) extracted constitutive parameters.

을 일으켜 음의 유전율을 가지는 epsilon-negative (ENG) 물질로 알려져 있다<sup>[5,7]</sup>.

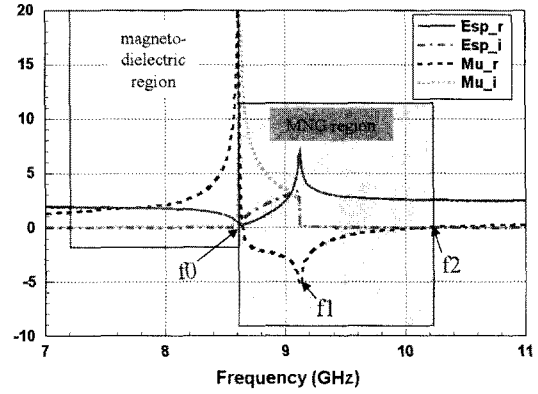
TW의 시뮬레이션 구조와 추출된 구조 파라미터를 그림 4에 나타냈다. 이때 전계 벡터 방향은 TW가 놓여 있는 방향으로 두어야 한다. 그림 4(b)에서 추출된 유전율은 음의 값을 가지며 투자율은 양의 값을 가져 ENG 물질임을 확인할 수 있다.

나. Split Ring Resonator (SRR)

투자율은 인가된 자속 밀도( $\vec{B}$ , Wb/m<sup>2</sup>)와 자계 필드 강도( $\vec{H}$ , A/m)의 비로 정의되므로, 물질의 투자율을 조절하기 위해서 주로 루프 모양의 삽입물(inclusion)을 이용한다. 대표적인 음의 투자율을 만드는 삽입물로 split ring resonator (SRR)가 있다. 1999년 영국의 Pendry 교수가 SRR이 음의 투자율 값을 가질 수 있음을 보인 이후<sup>[8]</sup>, SRR에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다<sup>[9-12]</sup>. 원형 루프에 자계가 입사되면 Faraday's law에 의해 자계의 시간적 변화에 따라 루프에 유도 전류가 발생한다. 이 유도 전류는 Lenz's law에 의해 인가된 자계를 방해하는 방향으로 발생한다. 이 유도 전류



(a)



(b)

그림 5. (a) SSRR 구조. (b) 추출된 구조 파라미터.  $aX = aY = aZ = 5$ ,  $R = 4$ ,  $depth = gap = w = 0.25$  (mm)  
Fig. 5. (a) SSRR structure. (b) extracted constitutive parameters.

에 의한 magnetic moment는 인가된 자계와 반대 위상을 가져 투자율을 증가시키지 못한다. 하지만 한 쪽이 끊어진 SRR의 경우 낮은 주파수 영역에서 capacitive 임피던스를 가져(루프의 경우는 inductive 임피던스를 가진다), 이 SRR에 유도되는 magnetic moment는 인가된 자계와 동위상이 된다. 따라서 SRR 자체는 magnetic dipole로 동작하게 되어 투자율이 1 보다 크게 된다. SRR의 자계 공진이 SRR 위의 원형으로 흐르는 전류에 의해 발생되며, 이 전류는 루프의 inductance와 SRR gap의 capacitance에 의해 결정된다. 이때 이 공진의 quality factor가 충분히 높을 경우 투자율이 음의 값도 가질 수 있게 된다<sup>[9]</sup>.

(1) Single SRR (SSRR)

그림 5에 single SRR(SSRR)의 구조와 추출된 구조 파라미터를 나타냈다. 여기서 공진 주파수를  $f_0$ , 최소 투자율을 가지는 주파수를  $f_1$ , 투자율 값이 양수로 바뀌는 주파수를  $f_2$ 라 명했다.  $f_0$ 는 약 8.7 GHz에서 나타나

표 1. SSRR의 전기적인 길이가 1% 증가할 때 특성 변화  
Table 1. Characteristics when the electrical size of SSRR increases 1 %.

	f0 (GHz)	f1 (GHz)	$\mu_r$	f2 (GHz)
R	-1.15	-1.09	-0.44	-0.77
gap	+0.92	+1.01	+1.69	+0.91
w	+0.59	+0.64	+1.49	+0.57
aX	-0.02	~ 0	+0.53	-0.07
aY	+0.09	+0.04	-0.40	-0.065
aZ	+0.06	+0.03	-0.27	-0.04
depth	-0.66	-0.53	+0.48	-0.23

며, 이 주파수에서 SSRR의 전기적 크기는 약  $0.15\lambda$  이다. SRR은 투자율이 1보다 큰 magneto-dielectric으로 사용되는데, 그림 (b)에서 약 7.2 GHz에서 8.6 GHz에 투자율이 1 보다 높은 영역이 나타남을 볼 수 있다. 이 영역을 이용하여 안테나의 대역폭을 넓힐 수 있다<sup>[13-14]</sup>. 투자율이 음수가 되는 mu-negative (MNG) 영역은 8.6 GHz에서 10.2 GHz에서 관측된다. 각 파라미터가 파장에 대해 1 % 증가할 때 f0, f1, f2 그리고 투자율 변화를 표 1에 나타냈다. 이때 정규화에 따른 주파수를 달리하였다. 예로 R이 f0의 파장으로 1 % 증가하면 f0는 1.15 GHz가 낮아지며, f1을 기준으로 1 % 증가하면 f1은 1.09 GHz가 낮아지고 투자율은 0.44가 낮아진다. 그리고 R이 f2를 기준으로 1 %를 증가하면 f2는 0.77 GHz가 낮아진다. gap과 w가 투자율 변화에 가장 큰 영향을 미치는데, 이는 SRR 위의 유도 전류가 gap의 capacitance에 영향을 많이 받기 때문이다.

R이 증가하면 등가 L과 C가 증가하여 f0가 감소하게 된다. gap이 증가하면 등가 C가 감소하게 되어 f0는 높아진다. w가 증가하면 등가 L이 감소하여 f0는 높아진다. 표로부터 이의 특성을 확인할 수 있다.

(2) Double SRR (DSRR)

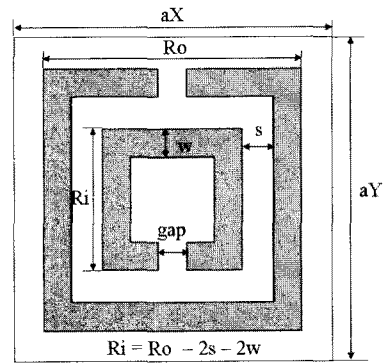
그림 6에 double SRR(DSRR)의 구조와 추출된 유효율과 투자율을 나타냈다. 물리적 크기는 SSRR과 동일하다. DSRR의 경우 두 SRR 사이에 캐패시턴스가 발생하여 f0가 SSRR보다 더 낮게 관측된다. f0에서 DSRR의 전기적 크기는 약  $0.14\lambda$  이다. Magneto-dielectric 영역은 약 7.4 GHz에서 8.4 GHz에서 관측되며, MNG 영역은 8.4 GHz에서 10 GHz에서 관측된다.

기본적인 파라미터 변화에 따른 DSRR의 경향은 SSRR의 경향과 동일하다. 투자율은 gap, w, s 그리고 depth에 영향을 많이 받는다. depth는 그림 6(a)에 나타

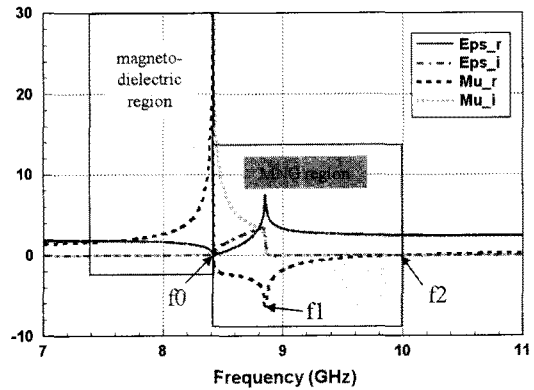
내지 않았는데, 그림 5(a)에서와 같이 SRR의 두께를 나타낸다. SSRR과는 달리 DSRR의 경우 depth는 두 SRR 사이의 capacitance에 영향을 미치므로 투자율에 미치는 영향이 크다.

(3) Modified SRR (MSRR)

그림 7에 modified SRR(MSRR) 구조와 추출된 유효



(a)



(b)

그림 6. (a) DSRR 구조. (b) 추출된 구조 파라미터. aX = aY = aZ = 5, Ro = 4, depth = gap = 0.25, s = 0.75, w = 0.25 (mm)

Fig. 6. (a) DSRR structure. (b) extracted constitutive parameters.

표 2. DSRR의 파라미터의 전기적인 길이가 1% 증가할 때 특성 변화

Table 2. Characteristics when the electrical size of DSRR increases 1 %.

	f0 (GHz)	f1 (GHz)	$\mu_r$	f2 (GHz)
Ro	-1	-0.9	-0.46	-0.6
gap	+0.57	+0.62	+0.91	+0.56
w	+0.69	+0.71	+1.23	+0.56
s	+0.33	+0.36	+0.68	+0.49
aX	-0.02	-	+0.54	-0.07
aY	+0.06	+0.03	-0.16	-0.03
aZ	+0.04	+0.02	-0.24	-0.03
depth	-0.72	-0.62	+0.87	-0.31

을 투자율을 나타냈다. MSRR은 SSRR과 DSRR이 가지고 있는 구조의 비대칭으로부터 기인하는 bianisotropy 문제를 해결한 구조이다<sup>[11-12]</sup>. 두 SRR 사이에 큰 capacitance가 발생하여  $f_0$ 가 다른 SRR 구조에 비해 낮다.  $f_0$ 에서 전기적 크기는 약  $0.12\lambda$  이다. Magneto-dielectric 영역은 약 5.5 GHz에서 6.9 GHz에서 관측되며, MNG 영역은 6.9 GHz에서 8.8 GHz에서

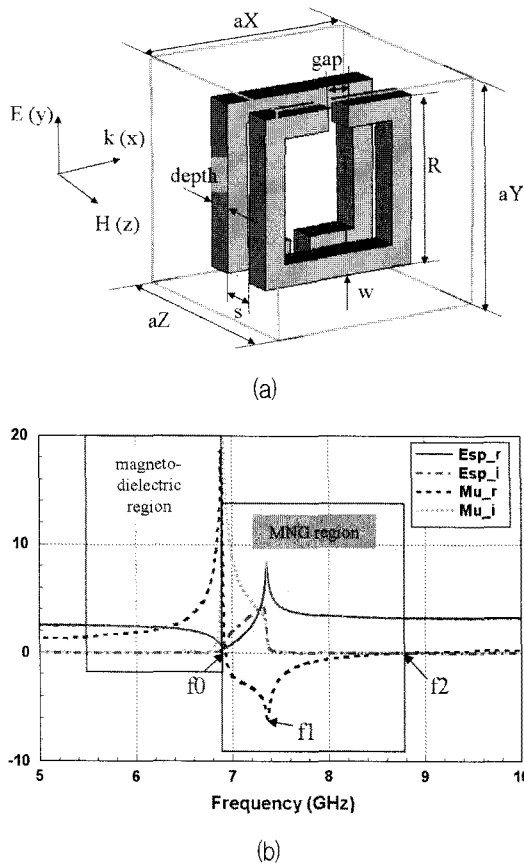


그림 7. (a) MSRR 구조. (b) 추출된 구조 파라미터.  $aX = aY = aZ = 5$ ,  $R = 4$ ,  $depth = gap = 0.25$ ,  $s = 1$ ,  $w = 0.25$  (mm)

Fig. 7. (a) MSRR structure. (b) extracted constitutive parameters.

표 3. MSRR의 파라미터의 전기적인 길이가 1% 증가할 때 특성 변화

Table 3. Characteristics when the electrical size of MSRR increases 1 %.

	f0 (GHz)	f1 (GHz)	$\mu_r$	f2 (GHz)
R	-1.23	-1.12	+0.67	-0.63
gap	+0.84	+0.93	+2.12	+0.76
w	+0.38	+0.37	+1.35	+0.17
s	+2.05	+2.15	+8.55	+2.19
aX	-0.02	-	0.65	-0.11
aY	+0.05	-	-0.32	-0.08
aZ	+0.09	+0.05	-0.53	-0.05
depth	-1.21	-1.16	+0.32	-0.7

관측된다.

기본적인 파라미터 변화에 따른 MSRR의 특성 변화는 다른 SRR 구조의 경향과 유사하다. 두 SRR 사이의 간격인  $s$ 가 투자율 값에 가장 큰 영향을 준다.

#### 다. TW와 DSRR이 합쳐진 double negative (DNG) MTM

그림 8에 TW와 DSRR을 합쳐서 유전율과 투자율이 동시에 음수가 나오는 double-negative (DNG) 단위 셀을 구성하였다. 그림 (b)에서 유전율과 투자율이 동시에 음수가 나오는 DNG 영역(6.3 GHz~7.3 GHz)을 확인할 수 있다.

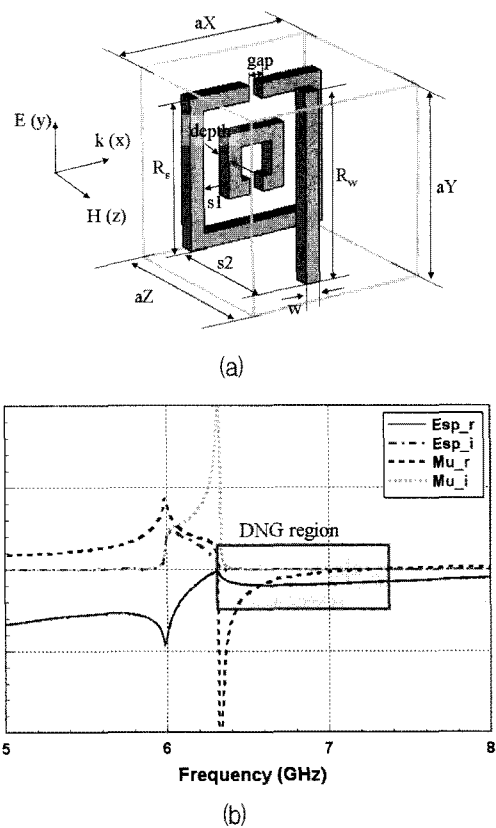


그림 8. (a) TW와 DSRR이 합쳐진 DNG 단위 셀 구조. (b) 추출된 구조 파라미터.  $aX = aY = aZ = 5$ ,  $R_s = 4$ ,  $R_w = 5$ ,  $depth = gap = 0.25$ ,  $s1 = 0.2$ ,  $s2 = 1.75$ ,  $w = 0.25$  (mm)

Fig. 8. (a) DNG unit cell composed of TW and D-SRR. (b) extracted constitutive parameters.

#### V. 시 영역 신호로부터 유전율 투자율 추출 방법

가. 시 영역 신호로부터  $S_{11}$ 과  $S_{21}$  얻는 방법

앞장의 구조 파라미터를 추출하는 방법은 무한한 크기의 구조의 유전율과 투자율을 빠르게 추출할 수 있다.

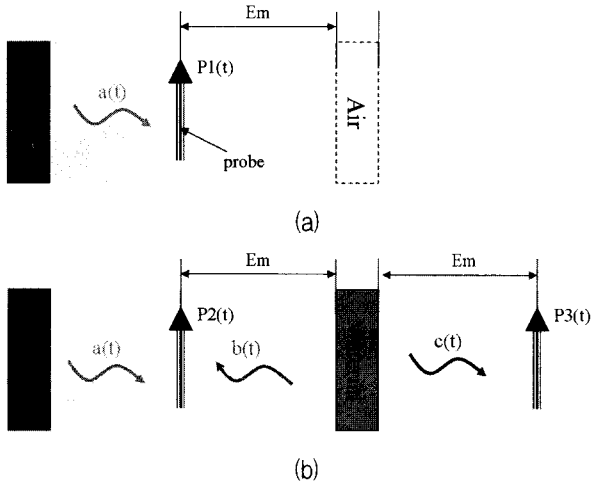


그림 9. 시 영역 신호로 S11과 S21 측정 방법. (a) 물질이 없을 경우. (b) 물질이 있는 경우.  
 Fig. 9. S11 and S21 measurement method using time domain signals. (a) without material. (b) with material.

하지만 가상의 도파관을 사용하기 때문에 실험으로 이를 증명할 수 없고, 유한 크기의 물질의 구조 파라미터를 추출할 수 없어 실제 유한한 구조에 적용할 수 없다. 또한 PEC와 PMC는 mirror 효과이기 때문에 대칭 구조에 대해서는 무한 주기 효과를 나타내지만, 비대칭 구조에 대해서는 정확한 무한 주기 구조를 나타내진 못한다. 실제 모델에도 적용할 수 있는 시뮬레이션 방법과 유전율 투자율을 추출하는 방법을 이 장에서 소개한다.

그림 9에서 시 영역의 신호로부터  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 얻는 시뮬레이션 방법을 나타냈다. 소스로부터 나온 신호를 추출하기 위해 자유 공간에서 시뮬레이션 한다(그림 a). 이 때 probe에 측정된 신호  $P1(t)$ 는 소스에서 나오는  $a(t)$ 이다. 물질을 넣고 동일한 시뮬레이션을 한다(그림 b). 이 때 투과 신호를 측정하기 위해 물질 뒤쪽에도 probe를 위치시킨다. 물질 앞쪽에 측정되는 신호  $P2(t)$ 는  $a(t)$ 와 반사 신호  $b(t)$ 가 합쳐진 신호이다. 물질 뒤쪽의 probe에서 측정되는 신호는 물질을 투과한  $c(t)$ 이다. 반사된 신호  $b(t)$ 는 간단히  $P2(t)$ 와  $P1(t)$ 를 빼서 얻을 수 있다.  $a(t)$ ,  $b(t)$ , 그리고  $c(t)$ 를 Fast Fourier Transform을 적용하여 주파수 영역 신호  $A(f)$ ,  $B(f)$ ,  $C(f)$ 를 얻는다. probe가 존재하는 위치에서  $S_{11}' = B(f)/A(f)$  과  $S_{21}' = C(f)/A(f)$ 를 계산할 수 있다.  $S_{11}'$ 과  $S_{21}'$ 를 물질이 존재하는 위치( $E_m$ )까지 reference plane을 이동시켜  $S_{11}$ 과  $S_{21}$ 을 얻을 수 있다. 이를 II장의 수식을 이용해 유전율과 투자율을 추출할 수 있다.

나. 개발된 코드 검증

개발된 코드를 검증하기 위해 유전율이 10이고, 투자율이 1인 물질과 그림 3(a)의 Lorentz 물질에 대해 이장에서 개발된 코드로 구조 파라미터를 추출했다(그림 10). 추출된 구조 파라미터는 물질의 원래 유전율 투자율과 매우 잘 일치한다.

본 장에서 개발된 시뮬레이션 기법은 4장의 방법보다 긴 시뮬레이션 시간을 요구하며, 시뮬레이션을 두 번 해야 하는 단점이 있다. 하지만 정확한 무한 주기 구조를 고려할 수 있으며, 유한한 크기를 갖는 구조의 구조 파라미터를 추출할 수 있는 장점이 있다.

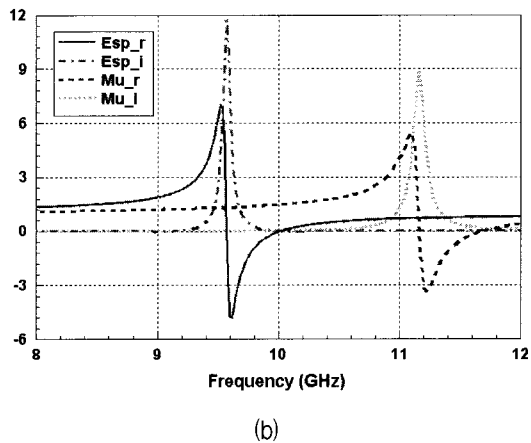
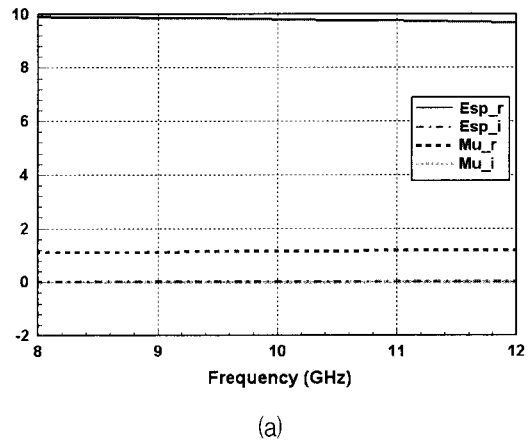


그림 10. 추출된 구조 파라미터. (a) 단일 물질  $\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ . (b) Lorentz 물질  
 Fig. 10. Extracted constitutive parameters. (a) single material with  $\epsilon_r = 10$ ,  $\mu_r = 1$ . (b) Lorentz material.

VI. 결론

본 논문에서는 유전율과 투자율을 추출하는 방법을

소개하고 대표적인 MTM 단위 셀의 유전율 및 투자율을 추출하였다. 가상의 도파관을 이용하여 구조 파라미터를 추출하는 방법으로 TW, SSRR, DSRR, MSRR 그리고 TW와 DSRR을 합친 단위 셀의 구조 파라미터를 추출하였다. TW는 음의 유전율을 가지는 ENG 물질로 동작하며, SSRR, DSRR, MSRR은 음의 투자율을 가지는 MNG 물질로 동작한다. 그리고 TW와 DSRR을 합친 구조는 음의 유전율과 음의 투자율을 가지는 DNG 물질로 동작한다. SSRR, DSRR, 그리고 MSRR의 파라미터 변화에 따른 유전율 투자율 변화를 정리하였다. SRR의 경우 투자율이 1 보다 높은 magneto-dielectric 영역이 나타남을 확인하였다. 가상의 도파관을 이용한 시뮬레이션 방법은 실제 구조를 정확하게 모델링할 수 없는 단점이 있는데, 이를 보완하여 실제 구조의 구조 파라미터를 추출할 수 있는 시 영역 신호를 이용한 추출 방법을 개발하였고 이를 검증하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*, Wiley-Interscience, 2006.
- [2] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, and C. M. Soukoulis, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients," *Physical Review E*, 71, 1951 04, 2002.
- [3] Richard W. Ziolkowski, "Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials," *IEEE Transaction on Antennas and Propa.*, vol. 51, no. 7, pp. 1516-1529, Jul. 2003.
- [4] D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," *Physical review E*, 71, 036617, 2005.
- [5] P. D.Imhof, "Metamaterial-based Epsilon Negative [ENG] Media: Analysis & Designs", Master Thesis, Electric and Computer Engineering at the University of Arizona, Feb. 2006.
- [6] C. C. Courtney, "Time-domain Measurement of the Electromagnetic Properties of Materials", *IEEE Trans, Micr. Theory. Tech.*, vol. 46, no. 5, May. 1998.
- [7] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. "Low frequency plasmons in thin-wire structure," *J. Phs, Condens. Letter*, vol. 10, pp. 4785-4809, 1998.
- [8] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart. "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Trans, Micr. Theory. Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [9] S. Maslovski, P. Ikonen, I. Kolmakov, and S. Tretyakov, "Artificial Magnetic Materials based on the New Magnetic Particle: Matasolenoid," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 54, pp. 61-81, 2005.
- [10] M. Kafesaki, Th Koschny, R. S. Penciu, T. F. Jundogdu, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, "Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties," *J. Opt. A*, 7, S12-22, 2005.
- [11] Marques, R., F. Medina, and R. Rafii-El-Edrissi, "Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials," *Phys. Rev. B*, 65:1440/1 - 1440/6, 2002.
- [12] I. Bulu, H. Caglayan, and E. Ozbay, "Experimental demonstration of labyrinth-based left-handed metamaterials," *Optics Express*, vol. 13, no. 25, Dec., 2005.
- [13] P. M. T. Ikonen, S. I. Maslovski, C. R. Simovski, and S. A. Tretyakov, "On artificial magnetodielectric loading for improving the impedance bandwidth properties of microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 6, pp. 1654 - 1662, Jun. 2006.
- [14] H. Mosallaei, and K. Sarabandi, "Design and modeling of patch antenna printed on magentor-dielectric embedded-circuit metasubstrate," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 1, pp. 45 - 52, Jan. 2007.



## 저 자 소 개



이 동 현(학생회원)  
2003년 아주대학교 전자공학부  
학사 졸업.  
2003년~현재 포항공과대학교  
전자전기공학과 석·박사  
통합 과정.

2006년~2007년 Visiting Scholar, Wireless  
Communications Research Group(WiCR),  
Loughborough University (UK).  
2007년 5월~2007년 12월 Visiting Scholar,  
Antenna and Electromagnetics Group,  
Queen Mary, University of London  
(UK).

<주관심분야 : Metamaterial, 이득 향상을 위한  
FSS superstrate, 안테나 설계 및 해석>



박 위 상(정회원)  
1974년 서울대학교 공과대학  
전자공학과 학사 졸업.  
1982년 University of Wisconsin  
Madison 전자공학과 석사  
졸업.

1986년 University of Wisconsin  
Madison 전자공학과  
박사 졸업.

1976년~1978년 삼성전자 공업주식회사.

1984년~1986년 8월 University of Wisconsin  
Madison, TA 및 RA.

1986년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과  
교수.

<주관심분야 : Design of Microstrip Antennas,  
Full-Wave Analysis of Microstrip Structures,  
Design of Passive Microstrip Devices by  
Network Modeling, Measurement and  
Simulation of EMI/EMC for Cellular Phones>