논문 2008-45TC-8-10

# Metamaterial의 전파 상수 및 물질 상수

## ( Propagation Constant and Material constants of Metamaterials )

이 동 현*, 김 재 희*, 박 위 상**

( Dong Hyun Lee, Jae Hee Kim, and Wee Sang Park )

요 약

본 논문에서는 유전율(ε′)과 투자율(μ′)이 양수인 double-positive (DPS) 물질에서 정의된 전파 상수를 epsilon-negative (ENG) 물질 (ε′ < 0, μ′ > 0), mu-negative (MNG) 물질 (ε′ > 0, μ′ < 0), 그리고 double-negative (DNG) 물질 (ε′ < 0, μ′ < 0)으로 확장하여 유도하였다. 이와 함께 유전율 손실(ε″)과 투자율 손실(μ″)이 전파 상수에 미치는 영향을 분석하여 이 물질에서 전파가 right-handed (RH) 혹은 left-handed (LH)로 동작하는지를 규명하였다. DPS와 DNG 물질은 ε″와 μ″의 값에 상관없이 각각 RH 그리고 LH 매질로 동작한다. 반면 ENG와 MNG 물질은 (ε′μ″ + ε″μ′)의 부호가 양수이면 RH, 음수이면 LH 매질로 동작하는 특이한 특성을 가진다.

Abstract

The propagation constant, which is defined for a double-positive (DPS) material of positive permittivity (ε′) and permeability (μ′), is extended and derived for an epsilon-negative (ENG) material (ε′ < 0, μ′ > 0), a mu-negative (MNG) material (ε′ > 0, μ′ < 0), and a double-negative (DNG) material (ε′ < 0, μ′ < 0). By investigating how the permittivity loss (ε″) and permeability loss (μ″) terms affect the propagation constant, we determine that the wave in the materials propagates as a right-handed (RH) triad or a left-handed (LH) triad. Regardless of the magnitudes of ε″ and μ″, DPS and DNG materials become RH and LH media, respectively. However, ENG and MNG materials possess unusual characteristics that both materials become a RH medium when the sign of (ε′μ″ + ε″μ′) is positive and they become a LH medium when the sign is negative.

**Keywords**: Metamaterial, Propagation Constant, Permittivity, Permeability.

## Ⅰ. 서 론

1967년 러시아 물리학자인 V. Veselago는 유전율과 투자율이 동시에 음이 되는 가상의 metamaterial (MTM)을 발표했다[1]. 이 물질 내에서 전파의 전계 벡터, 자계 벡터, 그리고 전파 상수 벡터는 기존의 오른손 법칙이 아닌 왼손 법칙을 따름을 보였다. 1998년과 1999년에 런던 Imperial College의 Pendry 교수가 음의 유전율을 가지는 thin wire (TW) 구조[2]와 음의 투자율 값을 가지는 split ring resonator (SRR) 구조[3]를 발표하였다. Duke 대학의 D. R. Smith 교수는 TW와 SRR이 합쳐진 MTM을 제안하였고, 이 MTM이 음의 굴절율을 가짐을 실험적으로 증명했다[4]. 이 후부터 MTM에 대한 연구가 본격적으로 시작되었으며 최근에는 MTM의 이론적인 연구에서부터 다양한 응용에 이르기까지 매우 활발히 연구되고 있다[5-7].

MTM은 넓은 의미로 자연계에 존재하지 않는 전자기적 특성을 가지는 인공적인 유효 동일 물질로 정의되며, 유효 물질 상수(유전율, 투자율)에 의해 전자기적 특성이 결정된다. 유전율(ε)과 투자율(μ)의 부호에 따라 물질을 그림 1과 같이 분류할 수 있다.

제 1 상한은 유전율과 투자율이 모두 양수인 double-

* 학생회원, ** 정회원 포항공과대학교
(Pohang University of Science and Technology)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2006-S018-03, 휴대방송 서비스가 가능한 초소형 복합형 안테나 기술 개발]

접수일자: 2008년7월20일, 수정완료일: 2008년8월1일

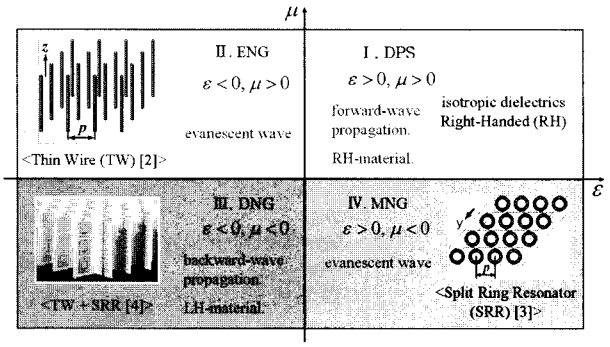


그림 1. 유전율과 투자율 부호에 따른 물질 분류. DPS: double positive, ENG: epsilon negative, DNG: double negative, MNG: mu negative. RH: right-handed. LH: left-handed. ε: 유전율. μ: 투자율

Fig. 1. Classification of material depending on signs of material's permittivity and permeability.

positive (DPS) 물질이 해당하며, 대부분의 일반 물질이 이 영역에 해당한다. 이 물질 내에서 전파는 오른손 법칙을 따른다. 이러한 특성을 연유로 이 물질을 right-handed (RH) 물질이라고도 한다. 제 2 상한영역은 유전율이 음수이고 투자율이 양수인 epsilon- negative (ENG) 물질이 이 영역에 해당한다. TW를 주기적으로 나열하여 이러한 특성을 얻을 수 있으며 감쇠가 커 전파는 이 매질에서 진행하지 못한다. 제 3 상한에는 유전율과 투자율이 동시에 음이 되는 double-negative (DNG) 물질이 해당한다. 이 물질 속에서 전파는 왼손 법칙을 따르면 진행하며, 음의 굴절율 등 특이한 전자기적 특성이 관찰된다. 이러한 특성을 연유로 이 물질을 left-handed (LH) 물질이라고도 한다. TW와 SRR을 합쳐 이러한 특성을 가지는 물질을 만들 수 있다. 제 4 상한에는 유전율이 양수이고 투자율이 음수인 mu-negative (MNG) 물질이 해당한다. SRR을 주기적으로 나열하여 이와 같은 특성을 얻을 수 있으며 ENG 물질과 마찬가지로 큰 감쇠로 인해 이 물질에서 전파는 진행하지 못한다.

본 논문에서는 기존에 DPS 물질에서 유도된 전파 상수($\gamma$)를 확장하여 ENG, MNG, 그리고 DNG 물질에서 유도하고 다양한 유전율 투자율 값에 따른 전파 상수의 특징을 분석하였다. 또한 유전율 손실과 투자율 손실에 따른 이 물질에서의 전파 상수를 분석하였다. 특히 ENG와 MNG 물질이 RH 매질로 동작하는지 LH 매질로 동작하는지 규명했다.

## Ⅱ. 손실이 있는 매질에서의 Maxwell 방정식

소스(source)가 없는 때 손실이 있는 매질에서의 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \overline{E} = -j\omega\overline{B} - \overline{M_c} \tag{1a}$$

$$\nabla \times \overline{H} = j\omega\overline{D} + \overline{J_c} \tag{1b}$$

$$\nabla \cdot \overline{D} = 0 \tag{1c}$$

$$\nabla \cdot \overline{B} = 0 \tag{1d}$$

여기서, $\overline{E}$: electric field intensity (V/m), $\overline{D}$: electric flux density (C/m$^2$), $\overline{H}$: magnetic field intensity (A/m), $\overline{B}$: magnetic flux density (W/m$^2$), $\overline{J_c}$: electric current density (A/m$^2$), $\overline{M_c}$: fictitious magnetic current density (V/m$^2$) 이다.

매질이 선형적이고 isotropic 하다면 $\overline{E}$와 $\overline{D}$ 그리고 $\overline{H}$와 $\overline{B}$는 아래와 같은 관계를 가진다.

$$\overline{D} = \epsilon_0\overline{E} + \overline{P} = \epsilon_0(1+\chi_e)\overline{E} = \epsilon_0\epsilon_r\overline{E} = \epsilon\overline{E} \tag{2a}$$

$$\overline{B} = \mu_0\overline{H} + \overline{M} = \mu_0(1+\chi_m)\overline{H} = \mu_0\mu_r\overline{H} = \mu\overline{H} \tag{2b}$$

여기서, $\overline{P}$: electric polarization, $\chi_e$: electric susceptibility, $\overline{M}$: magnetic polarization (magnetization), $\chi_m$: magnetic susceptibility, $\varepsilon_0 = 8.854\cdot10^{-12}$ (F/m): 자유 공간에서 유전율, $\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ (H/m): 자유 공간에서 투자율, $\varepsilon_r = 1 + \chi_e$: 물질의 상대 유전율, $\mu_r = 1 + \chi_m$: 물질의 상대 투자율이다. 물질의 상대 유전율과 상대 투자율을 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j\tan\delta_e) \tag{3a}$$

$$\mu_r = \mu' - j\mu'' = \mu'(1 - j\tan\delta_m) \tag{3b}$$

$$\tan\delta_e = \frac{\omega\epsilon'' + \sigma_e}{\omega\epsilon'} \tag{3c}$$

$$\tan\delta_m = \frac{\omega\mu'' + \sigma_m}{\omega\mu'} \tag{3d}$$

여기서, $\omega\varepsilon''$: dielectric damping에 의한 손실, $\omega\mu''$: magnetic damping에 의한 손실, $\sigma_e$: 유한 electric conductivity에 의한 손실, $\sigma_m$: 유한 magnetic conductivity에 의한 손실이다. 에너지 보존 법칙에 의해 $\varepsilon''$와 $\mu''$은 양수여야 한다[8].

## Ⅲ. 손실이 있는 매질에서의 전파 상수

식 (1)의 Maxwell 방정식을 연립한 Helmholtz 방정식을 풀어 전파 상수를 구할 수 있다. 이를 식 (4)에 나타냈다.

$$\nabla^2 \overline{E} + \gamma^2 \overline{E} = 0 \tag{4}$$

여기서,

$$\gamma^2 = -\omega^2 \epsilon \mu \tag{5}$$

이다.

식 (3)을 이용하여 식 (5)를 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}\gamma &= \alpha + j\beta \\ &= \pm j\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,\sqrt{\epsilon_r\mu_r} \\ &= \pm j\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,\sqrt{\epsilon'\mu' - \epsilon''\mu'' - j(\epsilon'\mu'' + \epsilon''\mu')}\end{aligned} \tag{6}$$

이때 ±가 붙어야 하는 것을 주의해야 한다. DPS 물질에서의 전파 상수는 양수만이 존재할 수 있지만 DNG 물질에서는 전파 상수가 음수가 된다. 따라서 유전율과 투자율이 양수 혹은 음수가 될 수 있는 일반적인 매질에서의 전파 상수를 유도할 때는 ±를 붙여야한다. 수식적으로 존재할 수 있는 ±의 두 해 중 물리적으로 존재하는 해를 선택해야 한다. 감쇠 상수인 $\alpha$는 물리적으로 항상 양수여야 하므로 $\alpha$가 양수가 되는 해를 선택하고 이 $\alpha$와 쌍을 이루는 위상 상수인 $\beta$를 해로 선택함으로써 원하는 해를 모두 찾을 수 있다.

식 (6)을 간단하기 위해 아래의 치환을 사용하였다.

$$A = \epsilon'\mu' - \epsilon''\mu'' \tag{7a}$$

$$B = \epsilon'\mu'' + \epsilon''\mu' \tag{7b}$$

식 (7)을 대입하여 식 (6)을 다시 정리하면 $\alpha$와 $\beta$를 아래와 같이 표현할 수 있다.

A ≥ 0인 경우,

$$\alpha = \pm\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,(A^2+B^2)^{1/4}\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)\right) \tag{8a}$$

$$\beta = \pm\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,(A^2+B^2)^{1/4}\cos\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)\right) \tag{8b}$$

A < 0인 경우,

$$\alpha = \mp\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,(|A|^2+B^2)^{1/4}\cos\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{B}{|A|}\right)\right) \tag{9a}$$

$$\beta = \mp\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,(|A|^2+B^2)^{1/4}\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{B}{|A|}\right)\right) \tag{9b}$$

## Ⅳ. Case Studies

이번 장에서는 DPS, ENG, MNG, 그리고 DNG에서의 전파 상수를 유도하고 그 특징을 살펴본다. 이와 함께 유전율 손실과 투자율 손실이 전파 상수에 미치는 영향을 분석하였다.

가. $\varepsilon' > 0$, $\mu' > 0$, $\varepsilon'' = \mu'' = 0$ (lossless DPS)

이 조건에서는 A가 0보다 크므로 식 (8a)와 (8b)로부터 $\alpha$와 $\beta$는 다음과 같다.

$$\alpha = 0 \tag{10a}$$

$$\beta = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,\sqrt{\epsilon'\mu'} \tag{10b}$$

이 때 DPS 물질은 $\varepsilon'$과 $\mu'$이 모두 양수이므로 양수의 $\beta$만이 해가 된다[5].

나. $\varepsilon' < 0$, $\mu' < 0$, $\varepsilon'' = \mu'' = 0$ (lossless DNG)

이 조건에서 $\alpha$와 $\beta$는 다음과 같다.

$$\alpha = 0 \tag{11a}$$

$$\beta = -\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,\sqrt{|\epsilon'||\mu'|} \tag{11b}$$

DNG 물질은 $\varepsilon'$과 $\mu'$이 모두 음수이므로 음수의 $\beta$만이 해가 된다[5].

다. $\varepsilon' > 0$, $\mu' > 0$, $\varepsilon'' \neq 0$, $\mu'' = 0$ (lossy DPS)

이 조건에서 $\alpha$와 $\beta$는 다음과 같다.

$$\alpha = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,(A^2+B^2)^{1/4}\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)\right) \tag{12a}$$

$$\beta = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\,(A^2+B^2)^{1/4}\cos\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)\right) \tag{12b}$$

여기서 $\alpha$를 양수로 선택해야 하기 때문에 $\beta$도 양수를 선택해야 한다. $\tan^{-1}(\epsilon''/\epsilon')$는 0에서 $\pi/2$ 값만을 가지므로 sin과 cos 값은 모두 양수가 된다. 따라서 $\beta$는 항상 양수가 되어 이 물질은 RH 매질이 된다.

라. $\varepsilon' < 0$, $\mu' < 0$, $\varepsilon'' \neq 0$, $\mu'' = 0$ (lossy DNG)

이 조건에서 $\alpha$와 $\beta$는 다음과 같다.

$$\alpha = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}(A^2+B^2)^{1/4}\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\epsilon''}{|\epsilon'|}\right)\right) \quad (13a)$$

$$\beta = -\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}(A^2+B^2)^{1/4}\cos\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\epsilon''}{|\epsilon'|}\right)\right) \quad (13b)$$

여기서 $\varepsilon'$이 음수이기 때문에 $\alpha$와 $\beta$의 부호가 반대가 되었다. 따라서 $\alpha$를 양수를 택하면 $\beta$는 음수가 되어 LH 매질이 된다. 이는 기존의 연구결과인 DNG 물질이 LH 매질로 동작한다는 것을 다시 확인시켜주는 결과이다.

DPS와 DNG에 대해 유전율 손실만을 고려했는데, 투자율 손실의 경우에도 동일한 결과를 나타낸다. DPS와 DNG의 경우 $\alpha$는 sin 함수를 따르고, $\beta$는 cos 함수를 따르게 된다. 즉, $\varepsilon''$과 $\mu''$이 작을수록 (손실이 작을수록), $\alpha$가 작아져 이 매질에서 전파는 감쇠없이 진행하게 된다. $\varepsilon''$과 $\mu''$이 매우 커져 $\tan^{-1}$의 함수 값이 $\pi/2$일 경우 $\alpha$와 $\beta$는 같은 값을 가진다.

마. $\varepsilon' < 0$, $\mu' > 0$, $\varepsilon'' = 0$, $\mu'' = 0$ (lossless ENG)와 $\varepsilon' > 0$, $\mu' < 0$, $\varepsilon'' = 0$, $\mu'' = 0$ (lossless MNG)

이 두 조건에서는 A가 0보다 작으므로 식 (9a)와 (9b)로부터 $\alpha$와 $\beta$는 다음과 같다.

$$\alpha = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\sqrt{|\epsilon'\mu'|} \quad (14a)$$

$$\beta = 0 \quad (14b)$$

손실이 없는 ENG와 MNG의 경우 $\beta$는 0이고, $\alpha$만 존재하기 때문에 이 매질에서 전파는 evanescent파가 되어 진행할 수 없게 된다.

바. $\varepsilon' < 0$, $\mu' > 0$, $\varepsilon'' \neq 0$, $\mu'' = 0$ (lossy ENG)

이 조건에서 A는 $\varepsilon'\mu'(< 0)$이고, B는 $\varepsilon''\mu'(> 0)$여서, $\frac{B}{|A|}$는 양수가 되어 $\alpha$와 $\beta$는 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}(|A|^2+B^2)^{1/4}\cos\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\epsilon''}{|\epsilon'|}\right)\right) \quad (15a)$$

$$\beta = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}(|A|^2+B^2)^{1/4}\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\epsilon''}{|\epsilon'|}\right)\right) \quad (15b)$$

Lossy ENG의 경우 lossless ENG와 달리 $\beta$가 존재한다. 따라서 전파는 위상 변화를 일으키며 지수적으로 감쇠한다. 이 때 전파가 진행하는 영역에서 $\beta$는 양수이므로 이 물질은 RH 매질이 된다.

사. $\varepsilon' < 0$, $\mu' > 0$, $\varepsilon'' = 0$, $\mu'' \neq 0$ (lossy ENG)

이 조건에서 A는 $\varepsilon'\mu'(< 0)$이고, B는 $\varepsilon'\mu''(< 0)$여서, $\frac{B}{|A|}$는 음수가 되어 $\alpha$와 $\beta$는 다른 ± 쌍을 가져 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha = +\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}(|A|^2+B^2)^{1/4}\cos\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)\right) \quad (16a)$$

$$\beta = -\omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}(|A|^2+B^2)^{1/4}\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)\right) \quad (16b)$$

따라서 이 경우 $\beta$는 음수가 되어 이 물질은 LH 매질이 된다. Lossy ENG 경우와 마찬가지로 큰 $\alpha$로 인해 이 매질 내에서 큰 감쇠가 발생한다. 하지만 전파가 진행하는 영역에서 이 물질은 LH 매질이 된다.

손실이 있는 MNG ($\varepsilon' > 0$, $\mu' < 0$)의 경우, 투자율 손실만 존재할 때($\varepsilon'' = 0$, $\mu'' \neq 0$)는 $\alpha$와 $\beta$가 식 (15a)과 (15b)로 표현되어 RH 매질이 되며, 유전율 손실만 존재할 때($\varepsilon'' \neq 0$, $\mu'' = 0$)는 $\alpha$와 $\beta$가 식 (16a)와 (16b)로 표현되어 LH 매질이 되다. 이와 같이 ENG와 MNG의 경우, 유전율 손실 및 투자율 손실에 따라 RH 혹은 LH 매질로 동작하는 매우 특이한 특성을 보인다.

ENG와 MNG의 경우는 $\alpha$는 cos 함수를 따르며, $\beta$는 sin 함수를 따르므로 $\varepsilon''$과 $\mu''$이 0일 때는 $\alpha$만 존재하게 되고, $\varepsilon''$과 $\mu''$ 커져 $\tan^{-1}$ 함수가 $\pi/2$ 값을 가질 때 $\alpha$와 $\beta$는 같게 된다.

표 1에 물질의 유전율 투자율 값에 따른 결과를 요약했다. DPS 물질과 DNG 물질은 $\varepsilon''$와 $\mu''$에 상관없이 각각 RH와 LH 매질이 된다. DPS는 A가 1 혹은 0의 값을 가지는 반면, DNG는 -1 혹은 0의 값을 가진다. ENG와 MNG 물질은 음수의 A 값을 가지며, B가 0보다 크면 RH가 되면, 0보다 작으면 LH가 된다. 표에서

표 1. 다양한 $\varepsilon'$, $\mu'$, $\varepsilon''$, $\mu''$ 값에 따른 결과 요약
Table 1. Results summary for various $\varepsilon'$, $\mu'$, $\varepsilon''$, and $\mu''$

| | $\varepsilon'$ | $\mu'$ | $\varepsilon''$ | $\mu''$ | A | B | $\alpha$ | $\beta$ | 비고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DPS | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 9.53 | 23.01 | RH |
| DNG | -1 | -1 | 1 | 0 | 1 | -1 | 9.53 | -23.01 | LH |
| DPS | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 20.94 | 20.94 | RH |
| DNG | -1 | -1 | 1 | 1 | 0 | -2 | 20.94 | -20.94 | LH |
| ENG | -1 | 1 | 1 | 0 | -1 | 1 | 23.01 | 9.53 | RH |
| ENG | -1 | 1 | 0 | 1 | -1 | -1 | 23.01 | -9.53 | LH |
| MNG | 1 | -1 | 0 | 1 | -1 | 1 | 23.01 | 9.53 | RH |
| MNG | 1 | -1 | 1 | 0 | -1 | -1 | 23.01 | -9.53 | LH |

ε′, μ′, ε″, μ″이 ±1 혹은 0의 비교적 간단한 값을 가질 때의 결과에 대해서만 살펴보았는데, 다른 값을 가지더라도 그 물질의 RH, LH 특성은 A와 B의 부호에 의해 결정된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존의 RH 물질에서만 정의되었던 전파 상수를 확장하여, 유전율 손실과 투자율 손실이 존재하는 ENG, MNG, DNG 물질에서의 전파 상수를 유도했다. 이를 위해 손실이 있는 매질에서 Maxwell 방정식을 기술하였고, 이로부터 ε′, ε″, μ′, 그리고 μ″의 부호에 따른 $\alpha$와 $\beta$를 유도하였다. 또한 ε′, ε″, μ′, 그리고 μ″이 특정 값을 가질 때의 $\alpha$와 $\beta$를 정리하였다. (ε′μ″ + ε″μ′)의 부호가 양수일 때는 RH 매질이 되며, 이 부호가 음수일 때는 LH 매질이 된다. DPS는 항상 RH 매질이 되며, DNG는 항상 LH 매질이 되지만, ENG와 MNG의 경우는 이 부호에 따라 RH 혹은 LH 매질이 결정되는 매우 특이한 특성을 가짐을 규명했다.

## 참 고 문 헌


[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, Jan. Feb. 1968.

[2] 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.

[3] 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.

[4] D. R. Smith, W. J. Padillia, D. C. vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys, Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000.

[5] C. Caloz, and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials,* Wiley-Interscience, 2006.

[6] G. V. Eleftheriades, and K. G. Balmain, *Negative-refraction metamaterials: fundamental principle and applications*, Johnwiley & Sons Inc., 2005.

[7] N. Engheta, and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics And Engineering Aspects*, John wiley & Sons Inc., 2006.

[8] D. M. Pozar, *Microwave engineering*, second edition, John wiley & Sons Inc., pp. 9, 1997.

## 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>

김 재 희(학생회원)
2004년 고려대학교 전기전자 전파공학부 학사 졸업.
2005년~현재 포항공과대학교 전자전기공학과 석·박사 통합과정.
<주관심분야 : 밀리미터파 빔 형성 안테나, 소형 안테나, Metamaterials>