

Drude 모형 특성을 갖는 메타 물질의 임계각에 관한 연구

A Study on Critical Angle of Metamaterial with Drude Model

이경원 · 홍익표* · 정영철** · 육종관

Kyung-Won Lee · Ic-Pyo Hong* · Yeong-Chul Chung** · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 드루드 모형(Drude model) 특성을 가지는 메타 물질의 굴절각 및 임계각을 해석적으로 분석하였다. 메타 물질 슬래브(slab)에서의 전자기파의 반사 및 투과 특성을 해석하기 위해 메타 물질에서 적용된 드루드 모형에서는 30 GHz에서 각각 -1의 값을 갖는 유전율, 투자율을 사용하였다. 해석 결과로부터 드루드 모형에서 물리 상수(physical constant)의 부호가 주파수에 따라 연속적으로 변하기 때문에 주파수 대역별로 굴절각과 임계각이 각각 서로 다른 특성을 갖는다는 사실을 유도하였다. 본 논문에서 유도한 메타 물질의 주파수에 따른 굴절각 및 임계각 특성은 메타 물질의 주파수와 물리 상수간의 특성과 같은 전자기적 특성을 이해하고, 메타 물질과 유전체간 다층 결합의 전파 특성 해석, 레이돔에 적용 가능한 신소재 메타 물질, 전기적 초소형 안테나와 같은 다양한 전자기파 응용에 유용하게 사용할 수 있다.

Abstract

In this paper, the refraction angles and the critical angles of metamaterials which is assumed by the Drude model are analytically studied. To analyze the electromagnetic reflection and the transmission properties of metamaterial slab, we used "-1" for the permeability and the permittivity at 30 GHz in Drude model for metamaterials in this paper, respectively. Due to the variation of signes of material constants for frequency ranges in Drude model, the derived refraction angle and the critical angles for each frequency ranges are differently observed. The results in this paper show that the properties the refraction angles and the critical angles for the broadband in metamaterials can be used to understand the electromagnetic properties of metamaterials and microwave applications.

Key words : Drude Model, Metamaterial, Refraction Angle, Critical Angle

I. 서 론

정보화 사회로의 급속한 발전 추세에 따라 무선 통신, 이동 통신에 적용될 수 있는 안테나 및 마이크로 파 회로의 응용 범위는 바이오 기술과 나노 기술 등이 정보 기술과 더불어 융합 분야로 더욱 다양해 지고 있으며, 중요성 또한 증가하고 있다. 학제간 융합을 비롯한 다양한 학문 분야에서 이러한 회로의

설계 기술에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 메타 물질과 같은 "전자기 신소재"를 이용한 마이크로 파 회로 응용에 관한 연구의 필요성도 점차 증가하고 있다.

1968년 Veselago^[1]에 의해 처음 제안된 메타 물질은 유전율과 투자율이 모두 음의 값을 갖고, 자연에서 일반적으로 발견할 수 없는 특수한 전자기적 물성을 보유하도록 설계된 인공적 구조를 가진 물질이

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University)

*공주대학교 정보통신공학부(Dept. of Information and Communication Engineering, Kongju National University)

**국방기술품질원(Defense Agency for Technology and Quality)

· 논문 번호 : 20080523-070

· 수정완료일자 : 2008년 7월 14일

다. 대표적인 메타 물질로는 NIM(Negative Index Material), DNG(Double Negative), LHM(Left Handed Material), BW(Backward Wave) 매질, EBG(Electromagnetic Band Gap) 구조, Hi-impedance(hi-z) 평면 구조 등이 있다. 1996년 Pendry^[2] 등이 금속성 막대로 이루어진 주기적 격자 구조의 유효 유전율이 특정 주파수 대역에서 음의 값을 가지며, 슬롯을 가진 원형 공진기 구조의 유효 투자율이 특정 주파수 대역에서 음의 값을 가진다는 사실을 밝히면서 메타 물질인 DNG 물질에 관한 연구가 각광을 받기 시작하였다^[3]. 2001년 Shelby^[4]는 메타 물질을 이용하여 DNG 물질을 구현하고 이를 통해 얻은 실험적 결과가 이론적으로 예상되었던 결과와 일치한다는 것을 보여주었다. 최근에는 메타 물질의 실험적 구현 뿐만 아니라 이론적 해석 및 수치 해석법을 이용한 분석, 마이크로 회로 응용 등 활발히 연구되고 있다^[5]. 또 다른, 메타 물질로서 LH 물질을 이용한 다양한 마이크로 회로 소자들이 발표되고 있다^[6].

LHM과 같은 메타 물질에 대한 수학적 모델링에는 물리적인 가역성을 만족하기 위해 주파수 분산 특성을 갖는 로렌츠(Lorentz) 또는 드루드 모형(Drude model)을 이용하여 주파수 영역에 따른 유전율과 투자율을 나타낼 수 있다^[7]. 단지, 로렌츠 모형(Lorentz model)과 드루드 모형(Drude model)은 모두 음수의 유전율과 투자율로 표현할 수 있지만, 로렌츠 모형(Lorentz model)은 공진점 주변의 협대역에서만 음수의 유전율을 갖는다는 단점이 있다. 반면 드루드 모형(Drude model)은 광대역에 대해 음수의 유전율을 가질 수 있기 때문에, 메타 물질의 모델로 많이 사용된다.

전파의 반사와 흡수와 같은 대부분의 전자기 문제에서는 유전율과 투자율이 양수인 물질에 대해 다루었지만 최근에는 메타 물질의 유전율과 투자율의 실수부가 양의 값 또는 음의 값을 가지는 경우에 대한 전파의 특성 분석에 대해 연구가 진행되고 있다^[8]. 특히 2006년 Tamayama^[9]는 메타 물질에 대하여 TE 또는 TM 모드의 전파가 입사되었을 경우 Brewster 각에 대하여 실험과 이론으로 정리하였다.

본 논문에서는 임의의 드루드 모형(Drude model) 특성을 가지는 메타 물질을 이용하여 굴절각 및 임계각에 대해 분석 및 정리하였다. 그리고 물리 상수

(physical constant)의 부호가 주파수에 따라 변하기 때문에 구간별로 나눠서 굴절각 및 임계각을 정리하였다.

II. 드루드 모형(Drude Model) 모델

서론에서 기술한 바와 같이 메타 물질은 물리적인 가역성을 만족하기 위해 주파수 분산 특성을 갖는 드루드 모형(Drude model)을 이용하여 주파수 영역에 대한 유전율과 투자율을 나타낼 수 있다.

식 (1)과 식 (2)는 주파수에 따른 유전율과 투자율의 손실 드루드 모형(lossy Drude model)의 공식이다.

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega - j\nu_e)} \quad (1)$$

$$\mu_r = 1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega(\omega - j\nu_m)} \quad (2)$$

여기서 ω_{pe} 는 전자적 플라즈마 주파수(electronic plasma frequency)이고, ω_{pm} 은 자기적 플라즈마 주파수(magnetic plasma frequency), ν_e 는 전자적 충돌 주파수(electronic collision frequency), ν_m 은 자기적 충돌 주파수(magnetic collision frequency)이다.

그림 1에 드루드 모형(Drude model)을 사용하여 주파수에 따른 유전율과 투자율 특성을 나타내었다. 그림 1은 손실 드루드 모형(lossy Drude model)의 공식에서 실수부만 취하여 그린 그래프이며, 식 (1)에서 $\omega_{pe} = 30$ GHz, $\nu_e = 0$ 으로 설정하면 $\epsilon(\omega)$ 는 $\omega = \omega_{pe}$ 인 경우 -1의 값을 갖게 되어 메타 물질의 특성을 가지며, 다른 주파수 대역에서는 서로 다른 값의 유전율을 갖는다. 그리고 식 (1)과 식 (2)에서의 플라즈마 주파수와 충돌 주파수를 동일하게 하면 유전율과 투자율이 동일하여 겹쳐짐을 알 수 있다. 주파수 범위는 0부터 100 GHz까지이며, 30 GHz에서 유전율 및 투자율 모두 -1이 되는 것을 알 수 있다.

그림 1에서 볼 수 있듯이 손실 드루드 모형(lossy Drude model)은 주파수 대역에 따라 유전율과 투자율 값이 (-)값에서 (+)값으로 변하게 된다. 따라서 드루드 모형(Drude model)에 대한 굴절각을 해석하기 위해서는 다음의 세 가지 조건에 따라 해석해야 한다. ①은 유전율, 투자율 모두 -1보다 작은 경우, 즉, $\epsilon_r < -1$, $\mu_r < -1$ 이고, ②는 유전율과 투자율이 -1과 0 사이의 값을 갖는 경우, 즉, $-1 \leq \epsilon_r < 0$, -1

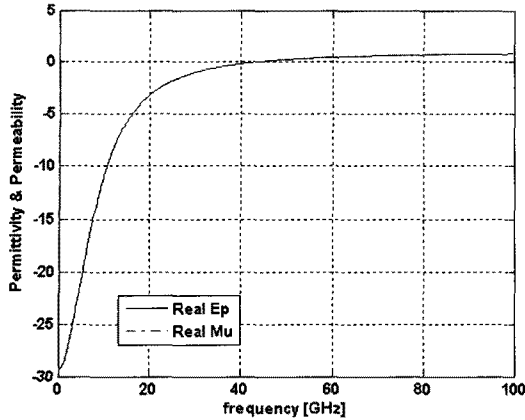


그림 1. 드루드 모형(Drude model)의 유전율과 투자율 특성

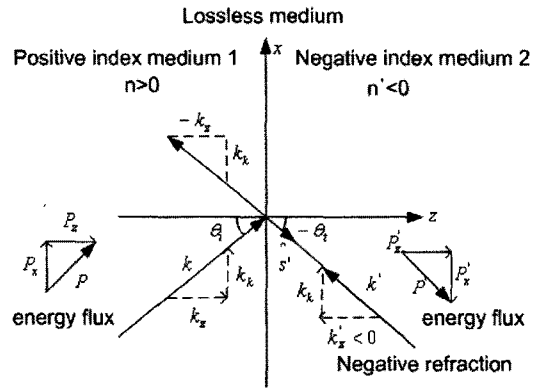
Fig. 1. Characteristic of permittivity and permeability for Drude model.

$\leq \mu, < 0$ 이고, ③은 유전율과 투자율이 0과 1 사이의 값을 갖는 경우, 즉, $0 < \epsilon_r \leq 1, 0 < \mu_r \leq 1$ 이다. 조건 ①의 경우 물리 상수(physical constant)가 (-)값이기 때문에 굴절각이 (-)값을 가짐을 예상할 수 있으며, 조건 ②와 ③의 경우 전반사가 되어 굴절각은 각각 (+)값의 임계각과 (-)값의 임계각을 가지게 됨을 예상할 수 있다.

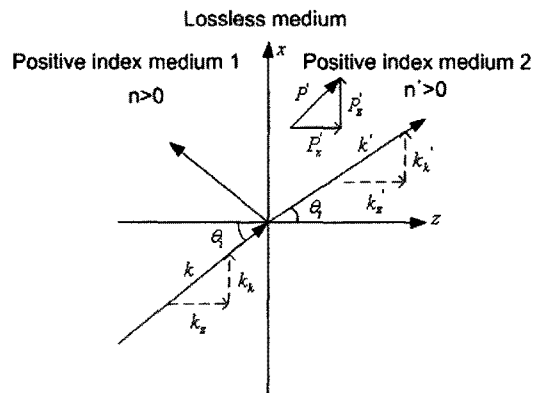
III. 메타 물질에서의 굴절각

그림 2는 파(wave)가 음의 지수(negative index)와 양의 지수(positive index)를 가지는 각 매질에 입사될 때의 파(k)의 방향과 에너지(P) 방향 및 각(θ)의 부호를 정리한 것이다. 그림 2(a)는 파(wave)가 음의 지수(negative index)를 갖는 매질에 입사할 경우이다. 투과된 파(k')는 (-)값을 가지며 방향은 입사 경계면을 향하게 되고, 에너지 방향은 P' 와 반대 방향을 향하게 되며, 굴절각은 $(-\theta_2)$ 각을 가지게 된다. 그림 2(b)는 파(wave)가 양의 지수(positive index)를 갖는 매질에 입사할 경우이다. 투과된 파(k') 에너지 방향(P'), 굴절각(θ_2) 모두 (+)값을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 2와 같이 파(k)가 입사각(θ_1)을 가지고 매질 1에서 매질 2로 입사할 때, 매질 2에서의 투과파는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 또한, TE 모드와 TM 모드는 모두 식 (3)으로 간단하게 표현할 수 있다.



(a) (-) 굴절율을 가지는 물질로의 파(wave)의 입사
(a) Refraction into a negative index medium



(b) (+) 굴절율을 가지는 물질로의 파(wave)의 입사
(b) Refraction into a positive index medium

그림 2. 각 매질로의 파(wave)의 경사 입사
Fig. 2. Oblique wave incidence into each medium.

매질 2의 음의 지수(negative index)는 그림 2(a)로 나타내며, 양의 지수(positive index)는 그림 2(b)로 나타낸다. 식 (3)에서 \pm 부분에서 (-)는 그림 2(a)의 매질 2의 음의 지수(negative index)에 해당되는 식이며, (+)는 그림 2(b)에서 매질 2의 양의 지수(positive index)에 해당되는 식을 나타낸다. 매질 2는 드루드 모형(Drude model)의 실수부만을 취한 것이기 때문에 비손실 매질이다. 따라서 식 (3)에서 파수(wave number) k_2 는 β_2 로 바꿔 쓸 수 있다.

$$E_t = E_2 \exp[-jk_2(x \sin \theta \pm z \cos \theta)] \\ = E_2 \exp[-j\beta_2(x \sin \theta \pm z \cos \theta)] \quad (3)$$

비 손실 매질에 Snell's law를 적용하면 식 (4), (5) 및 (6)을 얻을 수 있다.

$$k_1 \sin \theta_i = k_2 \sin \theta_t \quad (4)$$

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \quad (5)$$

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i} = se^{jv} \quad (6)$$

여기서 s 는 크기이며, v 는 위상항이다.

한편, 굴절각을 구하기 위해 식 (6)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 아래 식 (7)을 구할 수 있다.

$$E_t = E_2 e^{+j\beta z} \exp[-j(\beta_1 \sin \theta_i x \pm qz)] \quad (7)$$

여기서 $p = \beta_2 s \sin v$, $q = \beta_2 s \cos v$ 이다.

식 (7)을 순시 E-field로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon^t(\omega) &= \text{Re}(E_t e^{j\omega t}) \\ &= E_2 e^{+j\beta z} \text{Re}(\exp[j(\omega t - (\beta_1 \sin \theta_i x \pm qz))]) \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 θ_t 는 더 이상 굴절각이 아니다. 식 (10)에서 정의되는 ψ_2 가 실제 굴절각이 된다.

$$\begin{aligned} \omega t - (\beta_1 \sin \theta_i x \pm qz) &= \omega t - \sqrt{(\beta_1 \sin \theta_i)^2 + q^2} z \\ &\left[\frac{\beta_1 \sin \theta_i}{\sqrt{(\beta_1 \sin \theta_i)^2 + q^2}} x \pm \frac{q}{\sqrt{(\beta_1 \sin \theta_i)^2 + q^2}} z \right] \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 $u = \beta_1 \sin \theta_i$ 라 하면 ψ_2 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin \psi_2 = \frac{\beta_1 \sin \theta_i}{\sqrt{(\beta_1 \sin \theta_i)^2 + q^2}} = \frac{u}{\sqrt{u^2 + q^2}} \quad (10-a)$$

$$\cos \psi_2 = \frac{q}{\sqrt{(\beta_1 \sin \theta_i)^2 + q^2}} = \frac{q}{\sqrt{u^2 + q^2}} \quad (10-b)$$

$$\psi_2 = \tan^{-1}\left(\frac{\beta_1 \sin \theta_i}{q}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{u}{q}\right) \quad (10-c)$$

여기서 $p = \beta_2 s \sin v$, $q = \beta_2 s \cos v$ 이다.

식 (9)와 식 (10)에서 알 수 있듯이 매질 2의 지수(index)의 부호에 상관없이 매질 1에서 매질 2로의 굴절각을 식 (10)들로부터 구할 수 있음을 알 수 있다.

한편, 식 (6)에서 다음과 같은 두 가지 경우를 고려해 보기로 하자. 첫 번째는 앞에서 언급한 ① 조건에 해당하며, 이 경우 매질 2의 굴절각은 복소수 값이 아닌 실수 값으로 존재하게 된다. 두 번째는 ② 조건과 ③ 조건에 해당된다. 이 두 조건은 식 (6)의

값이 실수가 아닌 복소수가 되어 매질 2에 입사되는 파는 전반사(total reflection)가 일어나게 된다. 즉, 임계각(critical angle)이 존재하는 것을 의미한다. 따라서 2가지 경우를 상세하게 논의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &3-1 \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i < 1 \text{의 경우} (\epsilon_r < -1, \mu_r < -1 \\ &\text{이며 } n_2 < 0) \end{aligned}$$

식 (6)의 근호 안의 값이 1보다 작은 양수 값 즉, $0 < \cos \theta_t < 1$ 범위를 가지게 되며, θ_t 의 값이 복소수 값이 아닌 실수 값을 가지게 된다. 이것은 그림 3과 같이 입사각이 임계각보다 작기 때문에 굴절각이 존재하는 것을 의미한다. 하지만 여기서 주의할 것은 매질 2가 음의 지수(negative index)일 경우, 아래 식 (11)을 가지고 θ_t 를 바로 구할 수는 없다. 따라서 앞에서 유도한 굴절각을 나타내는 식 (10c)을 이용한다.

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i} = se^{jv} \quad (11)$$

식 (11)에서 $\cos \theta_t$ 가 $0 < \cos \theta_t < 1$ 의 범위를 가지기 때문에 실수이다. 따라서 $\cos \theta_t$ 의 크기는 s 이고, 위상각은 $v=0$ 이 됨을 알 수 있다. 이것을 식 (10c)에 대입하면 매질 2의 굴절각(ψ_2)을 구할 수 있다. 참고로, 매질 2의 지수(index)의 부호 정보는 β_2 에 있기 때문에 매질 2의 지수(index)의 부호에 상관없이 굴절각 ψ_2 를 구할 수 있다.

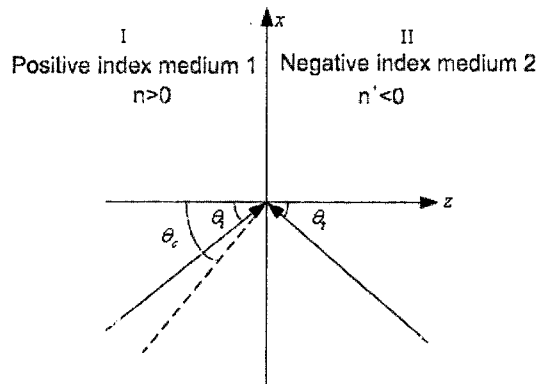


그림 3. 입사각이 임계각보다 작은 경우의 굴절각 (매질 2: 음의 지수(negative index))

Fig. 3. Refraction angle of the case that the incidence angle is smaller than the critical angle (medium 2: negative index).

3-2 $\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i \geq 1$ 의 경우

이 경우는 1)의 경우와는 달리, 식 (6)의 근호 안의 값이 1보다 큰 값을 가지게 되어 복소수 값을 가지게 되는 경우이다. 즉, $\cos \theta_i$ 가 순허수 형태가 되어 앞에서 언급한 것처럼 θ_i 는 더 이상 굴절각이 아니다. 이것을 해석하기 위해 앞에서 논의한 조건 ②와 조건 ③으로 다시 나눌 수 있다.

3-2-1 $-1 \leq \epsilon_r < 0, -1 \leq \mu_r < 0$ 및 $n_2 < 0$

식 (6)의 근호 안의 값이 1보다 큰 값을 가지기 때문에 식 (6)의 식은 아래 식 (12)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 (+)값을 택한 이유는 매질 2에서 유전율과 투자율이 (-)이기 때문에 그림 2(a)에서 k_z 가 -z 방향을 갖는다.

$$\cos \theta_i = +j \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i - 1} = se^{jv} \quad (12)$$

따라서 식 (12)는 순허수 형태인 복소수 (+j)항이다. 크기는 s로 표현되며 위상항이 $v=90^\circ$ 임을 알 수 있다. 이것을 식 (10c)에 대입하면 tan 값이 $-\infty$ 값($q = \beta_2 s \cos v$ 가 (-) 값을 가짐)을 가지게 되어 $\psi_2 = -90^\circ$ 가 된다. 따라서 입사파가 전반사(total reflection)되는 것을 알 수 있다.

3-2-2 $0 < \epsilon_r \leq 1, 0 < \mu_r \leq 1$ 및 $n_2 > 0$

i)에서와 마찬가지로 식 (6)의 근호 안의 값이 1보다 큰 값을 가지게 되며 복소수 값을 가진다. 하지만 식 (12)와는 달리 복소수 값을 (-)로 선택하여 식 (13)과 같이 쓸 수 있다. 매질 2에서 유전율과 투자율이 (+)값이기 때문에, 그림 2(a)에서 k_z 가 +z 방향이다.

$$\cos \theta_i = -j \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i - 1} = se^{jv} \quad (13)$$

식 (13)에서 순허수인 복소수 (-j)항이기 때문에 식 (12)와 마찬가지로 크기와 위상 항으로 표현할 수 있다. 크기는 s이며, 위상 항은 $v = -90^\circ$ 임을 알 수 있다.

마찬가지로 식 (10c)에 대입하면 tan 값이 $+\infty$ 값($q = \beta_2 s \cos v$ 가 (+)값을 가짐)을 가지게 되어 $\psi_2 = +90^\circ$ 가 된다. 따라서 입사파가 전반사(total reflection) 된다.

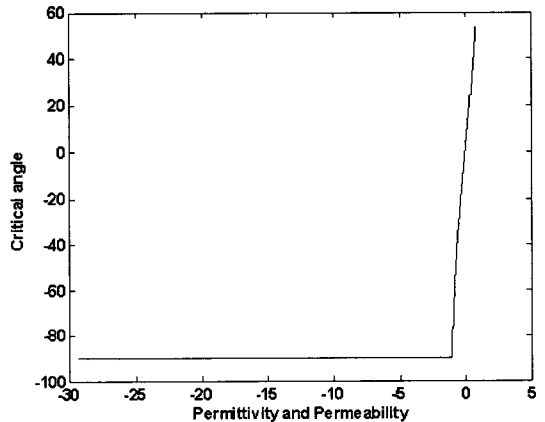
tion) 된다.

위의 해석을 바탕으로 적용된 드루드 모형(Drude model)의 임계각을 구하기 위해 식 (14)를 이용한다. 식 (15)는 입사각이 식 (14)의 임계각보다 크게 되면 wave가 전반사(total reflection)되는 조건이다^{[10],[11]}.

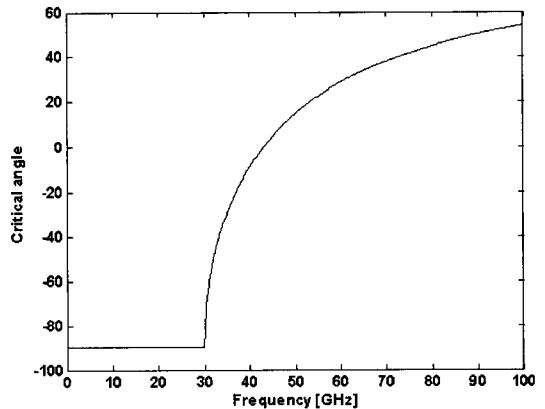
$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_i = 1 \quad (14)$$

$$\theta_i \geq \theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{\mu_2 \epsilon_2}{\mu_1 \epsilon_1} \right) \quad (15)$$

식 (14)를 적용한 드루드 모형(Drude model)의 임계각은 그림 4와 같다. 그림 4(a)에서 알 수 있듯이 물리 상수(physical constant: 유전율 및 투자율 <-1)



(a) 물리 상수(physical constant)에 따른 임계각 변화
(a) Variation of critical angle for material constant



(b) 주파수에 따른 임계각 변화
(b) Variation of critical angle for frequency

그림 4. 적용된 드루드 모형(Drude model)의 임계각
Fig. 4. Critical angle of the applied Drude model.

가 조건 ①에 대해서는 임계각이 $-90+jX$ 형태인 복소수를 가지기 때문에 임계각은 존재하지 않는다. 따라서 투과된 파는 전반사(total reflection)가 될 수 없음을 알 수 있다. 임계각이 존재하기 시작하는 곳은 물리 상수(physical constant: 유전율 및 투자율=-1)가 -1인 지점부터이다. 따라서 조건 ②와 조건 ③에서 임계각이 존재함을 알 수 있다.

그림 4(b)는 주파수 변화에 따른 임계각의 변화를 나타낸 것이다. 이것 역시 주파수 0~30 GHz(조건 ①)까지는 임계각은 $-90+jX$ 형태인 복소수를 가지기 때문에 임계각은 존재하지 않는다. 30 GHz 이상(조건 ②와 조건 ③)부터 임계각이 존재하게 된다. 이것은 30 GHz에서 물리 상수(physical constant)가 -1 값을 가지게 되기 때문이다. 그림 4의 그래프를 조건 ①, ②, ③에 따라 표로 정리한 것이 표 1과 표 2이다.

그림 4와 표 1 및 2를 이용하여 입사각에 따른 매질 1(공기)에서 매질 2(Drude model)로 입사파가 진행해 갈 때의 임계각을 구할 수 있다. 입사파의 입사각도를 1°, 10°, 30°, 50°, 60°, 89°로 하고 이에 대응하는 굴절각을 구하였다. 여기서 입사각이 0도와 90도 굴절각에 대해서는 의미가 없기 때문에 0과 90도가까운 1도와 89도를 선택하였다. 한편, 여러 가지 입사 각도에 따른 굴절각은 그림 5와 같다. 그림 5에

표 1. 물리 상수별 임계각(조건 ①, ②)

Table 1. Critical angle for each physical constant(Condition 1, 2).

Frequency [GHz]	<30	30	31	35	39.7
Permittivity and permeability	<-1	-1	-0.87	-0.5	-0.17
Critical angle	$-90+jX$	-90	-60	-30	-10

표 2. 물리 상수별 임계각(조건 ③)

Table 2. Critical angle for each physical constant(Condition 3).

Frequency [GHz]	43.1	47.5	61.4	90	99.9
Permittivity and permeability	0	0.17	0.5	0.77	0.81
Critical angle	불연속	10	30	50	54

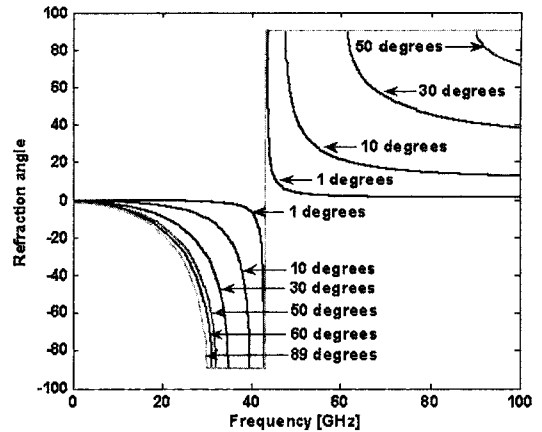


그림 5. 입사각에 따른 굴절각 변화

Fig. 5. Variation of refraction angle due to incident angle.

서 각 입사각들에 따라서 굴절각이 (-)값을 가지다가 갑자기 (+)으로 변하게 되는 불연속점이 존재한다. 이것은 드루드 모형(Drude model)의 물질 상수 값이 (-)에서 (+)값으로 변하면서 0이 되는 지점이 생기게 되는데, 이 부분은 굴절각의 불연속이 생기는 점이다. 따라서 임계각 역시 -90도에서 +90도로 변하는 것이다. 입사파가 1도의 각도를 가지고 입사된다면 매질 2에서의 굴절각은 물리 상수(physical constant) 0을 제외한 모든 주파수 대역에서 존재한다. 즉, 임계각이 존재하지 않음을 알 수 있다. Wave가 입사각 10도로 입사한 경우, 입사각 10도에 대하여 표 1과 2를 참조하면 39.7 GHz에서의 물리 상수 -0.17(표 1)부터 47.5 GHz에서의 물리 상수(physical constant) 0.17(표 2)까지의 사이 임계각이 입사각 10도보다 같거나 작다. 즉, 입사각이 임계각보다 크기 때문에 물질 상수 -0.17~0.17인 부분에서 전반사가 일어나게 된다. 그림 5에서 그래프의 가로 축인 주파수 부분을 보게 되면 전반사가 39.7~47.5 GHz 부분에서 일어남을 알 수 있다. 입사각이 30도일 경우, 물리 상수(physical constant) -0.5~0.5인 부분 즉, 주파수 35~61.4 GHz 부분에서 전반사가 일어난다. 입사각 50도는 주파수 32 GHz 아랫 부분과 90 GHz 윗부분에서 굴절각이 존재하지만 그 외의 부분에서는 모두 전반사가 일어나게 되고, 입사각이 60°인 경우 31 GHz 지점이 굴절각과 임계각의 경계가 된다. 입사각 89도의 경우 30 GHz 아랫 부분을 제외

한 모든 부분이 전반사가 된다.

IV. 결 론

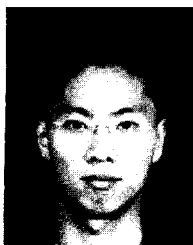
본 논문에서는 드루드 모형(Drude model) 특성을 가지는 메타 물질의 물리 상수 범위를 세 조건으로 나누어 굴절각을 해석적으로 분석하였으며, 입사각에 따른 메타 물질에 대한 임계각을 분석하였다. 적용된 메타 물질의 물리 상수(physical constant: 유전율, 투자율)가 -1 의 값보다 작은 경우, 임계각이 복소수가 되어 입사각에 따른 임계각은 존재하지 않는다. 물리 상수(physical constant)가 -1 에서 0 사이 또는 0 에서 1 사이의 값을 가지게 되면 임계각이 존재하게 되어 입사각에 따른 고유 임계각을 가진다. 본 논문의 내용은 드루드 모형(Drude model)의 메타 물질처럼 물리 상수(physical constant)가 $(-)$ 값에서 $(+)$ 값 또는 $(+)$ 값에서 $(-)$ 값으로 변화하는 것에 상관없이 물질의 굴절각 및 임계각을 정확하게 분석하고 해석하는 데에 이용할 수 있다고 생각된다. 또한, 본 논문에서 유도한 메타 물질의 주파수에 따른 굴절각 및 임계각 특성은 메타 물질의 주파수와 물리 상수 간의 특성과 같은 전자기적 특성을 이해하고, 메타 물질과 유전체간 다층 결합의 전파 특성 해석, 레이저에 적용 가능한 신소재 메타 물질, 전기적 초소형 안테나와 같은 다양한 전자기파 응용에 유용하게 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] V. G. Veselago, "Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities", *Soviet Physics Uspekbi*, vol. 10, no. 4, pp. 5-13, Jan.-Feb., 1968.
 [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I.

Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Physical Review Letters*, vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, Jun. 1996.
 [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced linear media", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
 [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verifications of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
 [5] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, IEEE, 2006.
 [6] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*, John Wiley & Sons, 2006.
 [7] S. Gunduz, M. Gakir, G. Gakir, and L. Sevgi, "Metamaterials and FDTD based numerical modeling studies", *5th International Conf. on Electrical and Electronics Eng.*, Dec. 2007.
 [8] Akira Ishimaru, John Rhodes Thomas, and Sermak Jaruwatanadilok, "Electromagnetic waves over half-space metamaterials of arbitrary permittivity and permeability", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 3, Mar. 2005.
 [9] Y. Tamayama, T. Nakanishi, K. Sugiyama, and M. Kitano, "Observation of Brewster's effect for transverse-electric electromagnetic waves in metamaterials: experiment and theory", *The American Physical Society*, 2006.
 [10] Sophocles J. Orfanidis, "Electromagnetic waves and antennas", www.ece_rutgers.edu/~orfanidi/ewa, pp. 238-299.
 [11] Constantine A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, pp. 185-220.

이 경 원



2003년 2월: 대전대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로파 해석, Radome

정 영 철



1993년 4월~현재: 국방기술품질원 선임연구원
 2001년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로파 수치해석

홍 익 표



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
 2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar

2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 조교수
 [주 관심분야] 전자기 수치해석, 스펙트럼 관리, 이동 통신

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow

1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수
 [주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막공진 구조