

# 유전율 및 투자율에 따른 인공자계도체 특성 및 다이폴 안테나 간 상관관계 분석

이동현<sup>†</sup> · 민태홍 · 이종무

## Analysis of AMC Characteristics According to Material Constants and Correlation of Dipole Antenna

Donghyun Lee<sup>†</sup> · Taehong Min · Jongmoo Lee

### ABSTRACT

In this paper, we theoretically examine the characteristics of an Artificial Magnetic Conductor (AMC) constructed of a perfect electric conductor and a normal material having permittivity  $\epsilon_r$ , permeability  $\mu_r$ , and thickness  $L$ . First, we derived rigorous equations to describe the infinite AMC structure. Then, we studied how the AMC's characteristics are affected by changes in  $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$  and  $L$ . The operating center frequency exhibiting a  $0^\circ$  reflection coefficient phase occurs when  $L$  is one quarter of a guide wavelength. Therefore, the AMC thickness can be reduced by using a material having a high product of  $\epsilon_r$  and  $\mu_r$ . As the ratio  $\mu_r/\epsilon_r$  increases, the bandwidth of the AMC increases (maximum value: 200 %), and its operating frequency decreases. We also find out the bandwidth of the AMC is improved by introducing a loss in the material. To validate the AMC, we design a dipole antenna on the AMC and demonstrate a relationship between AMC phase and dipole antenna's operating frequency by investigating the dipole on the AMC with different pairs of  $\epsilon_r$  and  $\mu_r$ .

**Key words** : Artificial Magnetic Conductor(AMC), Permittivity, Permeability, Dipole Antenna

### 요약

이 논문에서는 도체 위 물질의 유전율 투자율에 따른 인공자계도체 특성을 이론적으로 고찰하고 이 인공자계도체 위에 다이폴 안테나와의 상관관계를 규명했다. 먼저 도체 위 물질이 인공자계도체로 동작하는 주파수 및 대역폭을 수식으로 유도하고, 이를 통해 유전율( $\epsilon_r$ ), 투자율( $\mu_r$ ), 그리고 물질 두께( $L$ )가 인공자계도체의 특성에 어떤 영향이 있는지 분석했다. 물질 두께가  $\lambda/4$ 가 되는 주파수에서 반사계수 위상이  $0^\circ$ 이 되므로 높은 유전율과 투자율을 가지는 물질로 인공자계도체 설계 시 두께를 줄일 수 있고, ' $\mu_r/\epsilon_r$ ' 값이 커질수록 인공자계도체 동작 대역폭은 증가(최대 200%)하며, 동작 주파수는 낮아지는 것을 밝혀냈다. 또한 물질의 손실이 존재하면 인공자계도체의 대역폭이 증가하는 것을 확인했다. 인공자계도체 위에 다이폴 안테나를 설계하고 유전율과 투자율을 변경하면서 인공자계도체 표면 반사 위상과 다이폴 안테나의 동작 주파수를 관계를 시물레이션을 통해 규명하였다.

**주요어** : 인공자계도체, 유전율, 투자율, 다이폴 안테나

## 1. 서론

1968년 러시아 과학자 베셀라코가 음의 유전율과 투자율에 대한 전자기적 해석(V. G. Veselago, 1968) 이후에 2000년대 초반 이러한 물질을 실제로 구현되고 이 물질에 대한 다양한 연구가 진행되었다(D. R. Smith et al, 2000, R. A. Shelby et al, 2001, C. Caloz et al, 2001).

**Received:** 17 June 2019, **Revised:** 2 January 2020,

**Accepted:** 2 January 2020

**† Corresponding Author:** Donghyun Lee

E-mail: donghyun@add.re.kr

Agency for Defense Development, Daejeon, Korea

이 물질은 자연계에 존재하지 않는 흥미로운 전자기적 특성을 가지는데, 이 특성 중 하나는 자계도체이다. 일반적인 도체는 표면에서 접선 전계가 존재하지 않고, 반사계수의 위상이 180°이다. 다이폴 안테나를 도체 위에 근접시키면 도체에 안테나의 위상과 반대의 전류가 흘러 안테나의 성능이 저하된다. 이에 반해 자계 도체는 표면에서 접선 자계가 존재하지 않고, 반사계수의 위상이 0°인 도체를 의미한다. 다이폴 안테나를 자계도체 위에 근접시키면 도체에 안테나와 동일한 방향의 전류가 흘러 안테나의 성능 저하 없이 금속에 부착할 수 있게 된다. 앞서 설명한 대로 이러한 자계도체는 인공적으로 구현하여 통상적으로 인공자계도체라고 부른다.

대표적인 인공자계도체는 버섯모양의 단위 셀로 구성 되어있다(Yousefi et al, 2003). 버섯모양의 인공자계도체는 다수의 단위 셀 배치에 따른 큰 공간이 필요로 하고 좁은 대역폭을 가지는데, 이러한 단점을 극복하기 위해서 단위 셀 모양을 변경(A. Erentok et al, 2005, R. Li et al, 2018)하거나 단위 셀에 lumped 소자를 집적화하는 연구(M. Fujii et al, 2019)가 보고되었다. 인공자계도체 자체 특성 뿐 아니라 안테나 응용에 대해서도 많은 발표가 되고 있는데, 대표적인 분야가 wearable 안테나(S. Zhu et al, 2009, S Yan et al, 2014, M. Mantash et al, 2016, A. Alemaryeen et al, 2019)이다. 그 외 인공자계도체의 대역폭을 향상(L. Yousefi et al, 2003), 모노폴 안테나의 방사 패턴을 제어(A. Jafarholi et al, 2010), 원형 편파에 적합한 구조(K. Agarwal et al, 2013, D. Feng et al, 2017) 등의 연구가 활발히 발표되고 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 인공자계도체에 대한 연구는 주로 인공자계도체 구현 방법 그리고 응용에 집중되어 있으며, 물질의 유전율과 투자율에 따른 인공자계도체 특성에 관한 연구 보고는 찾아보기 힘들다. 본 논문에서는 임의의 유전율과 투자율을 가지는 물질이 도체 위에 존재할 때 유전율과 투자율에 따른 인공자계도체 특성을 고찰하고자 한다. 이를 위해 이 논문의 2장에서는 물질의 유전율( $\epsilon_r$ ), 투자율( $\mu_r$ ) 그리고 두께( $L$ )에 따른 인공자계도체의 동작 주파수 및 대역폭을 수식으로 유도하고, 유전율 및 투자율이 인공자계도체의 대역폭에 어떤 영향을 미치는지 분석한다. 3장에서는 물질의 유전율 및 투자율 손실이 존재하는 경우에 인공자계도체 동작 주파수 및 대역폭을 수식으로 유도하고, 손실이 인공자계도체 특성에 어떤 영향을 미치는지 분석한다. 4장에서는 이 인공자계도체 위에 다이폴 안테나를 설계하여 안테나의 동작 주파수와 인공자계도체 동작 주파수와와의 상관관계를 규

명한다. 끝으로 5장에서는 결론을 맺도록 한다.

## 2. 무손실의 인공자계도체

그림 1에 도체 위에 유전율( $\epsilon_r$ ), 투자율( $\mu_r$ ) 그리고 두께( $L$ )를 가지는 물질을 나타냈다. 이 물질에서의 입력 임피던스( $Z_{in}$ )는 수식(1)과 같다.

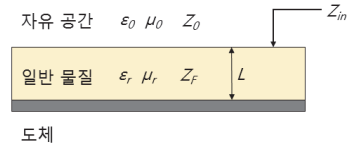


Fig. 1. Geometry of a Material on a Conductor

$$Z_{in} = jZ_F \tan(\beta L) \tag{1}$$

여기서  $\beta$ 는 물질에의 전파 상수이며,  $Z_F$ 는 물질의 고유 임피던스이다.

$$Z_F = \sqrt{\mu_r/\epsilon_r} Z_0 \tag{2}$$

$Z_0$ 는 자유공간의 임피던스이며 약 377Ω 이다. 물질의 반사계수는 수식 (3)과 같이 표현된다.

$$\Gamma = \frac{jZ_F \tan(\beta L) - Z_0}{jZ_F \tan(\beta L) + Z_0} = \frac{j\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tan(\beta L) - 1}{j\sqrt{\mu_r/\epsilon_r} \tan(\beta L) + 1} \tag{3}$$

따라서 반사계수 위상은 아래와 같이 유도된다.

$$\angle \Gamma = \pi - 2 \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tan(\beta L) \right) \tag{4}$$

물질 내 손실이 없기 때문에 반사계수 크기는 1이다. 인공자계도체로 동작하는 주파수는 반사계수 위상이 0이 되는 곳이며, 수식(4)로부터 아래와 같이 유도된다.

$$f_{0,AMC} = \frac{c}{4L\sqrt{\epsilon_r\mu_r}} \tag{5}$$

여기서  $c$ 는 빛의 속도이다. 수식 (5)로부터 인공자계도

체로 동작하는 물질의 두께는 아래와 같다.

$$L = \frac{\lambda_g}{4} = \frac{\lambda_0}{4} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (6)$$

이 수식으로부터 물질의 유전율과 투자율이 증가하면 낮은 두께로 인공자계도체를 설계할 수 있음을 알 수 있다.

인공자계도체의 대역폭을 반사계수 위상  $\pm 90^\circ$ 로 정의하면 그 대역폭(BW)은 아래와 같이 표현된다.

$$BW = \frac{\Delta f}{f_{0,AMC}} = 2 - \frac{4}{\pi} \tan^{-1} \left( \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\mu_r}} \right) \quad (7)$$

이 수식에 따라 대역폭은  $\epsilon_r/\mu_r$ 이 무한한 값일 때 최소인 0%가 되고,  $\epsilon_r/\mu_r$ 이 0이 될 때 대역폭은 최대인 200%가 된다. 따라서 넓은 대역폭을 가지기 위해서는 투자율은 높아야 하며, 유전율은 낮아야 한다. 이 결과를 검증하기 위해 다른 유전율과 투자율을 가지는 3가지 물질의 반사계수를 Matlab으로 시뮬레이션했으며 이를 그림 2에 나타냈다.

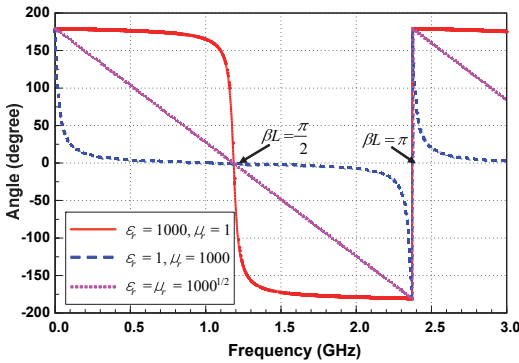


Fig. 2. Reflection coefficient phases for three different cases

3가지 경우 모두  $\epsilon_r \cdot \mu_r$ 이 1000로 설정하여 1.19GHz에서 인공자계도체 특성이 나타나도록 설계했다. 물질의 두께는  $0.008\lambda_0$ 로 설정했다. 수식 (7)에서부터 유전율이 1000이고, 투자율이 1인 경우 대역폭은 4%이고, 유전율과 투자율이  $1000^{1/2}$ 인 경우 대역폭은 100%이고, 유전율이 1이고, 투자율이 1000인 경우 대역폭은 196%가 된다. 동일한 중심 주파수를 가지더라도 투자율이 높을수록 인공자계도체의 대역폭이 커지는 것을 확인할 수 있다.

다른 유전율과 투자율 조합에 따라 동일한 인공자계도체 주파수 1.19GHz를 가지도록 물질 두께(L)로 변경시켜 인공자계도체를 설계하였으며, 이의 특성을 표 1에 나타냈다.

Table 1. AMC Characteristics for different  $\epsilon_r, \mu_r, L$

$\epsilon_r$	$\mu_r$	$\epsilon_r \cdot \mu_r$	$\epsilon_r / \mu_r$	$L$		BW (%)
				mm	in $\lambda_0$	
1	1	1	1	63.25	0.250	100
10	1	10	0.1			39
$\sqrt{10}$	$\sqrt{10}$	10	1	20	0.079	100
1	10	10	10			161
100	1	100	0.01			12.7
10	10	100	1	6.32	0.025	100
1	100	100	100			187.3
1000	1	1000	0.001			4
$\sqrt{1000}$	$\sqrt{1000}$	1000	1	2	0.008	100
1	1000	1000	1000			196

유전율 투자율 곱이 1, 10, 100, 1000으로 커질수록 두께의 전기적인 길이는 줄어드는 것을 볼 수 있고, 투자율이 클수록 인공자계도체 대역폭은 증가하는 것을 볼 수 있다. 투자율이 높은 물질을 쓸수록 두께는 줄이고 대역폭은 증가시킬 수 있다. 유전율과 투자율이 1인 자유공간의 경우 인공자계도체는  $63.25\text{mm}$ 이고 이는  $0.25\lambda_0$ 에 해당한다. 이는 잘 알려진 바와 같이 도체로부터  $0.25\lambda_0$ 이 떨어지면 반사계수의 위상이 0이 되는 것과 같은 의미이다.

### 3. 손실의 인공자계도체

손실이 있는 물질의 복합 유전율과 투자율을 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon_c = \epsilon_0 \epsilon_r (1 - j \tan \delta_e) \quad (8)$$

$$\mu_c = \mu_0 \mu_r (1 - j \tan \delta_m) \quad (9)$$

여기서  $\tan \delta_e$ 는 전계 손실 Tangent이며,  $\tan \delta_m$ 은 자계 손실 Tangent이다. 전파 상수  $\beta$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \beta &= \omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \\ &= \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \sqrt{(1 - j \tan \delta_e)(1 - j \tan \delta_m)} \end{aligned} \quad (10)$$

전파상수의 루트 안에 복소수가 존재하여 반사계수 위상을 손실이 없는 인공자계와 같이 간단히 표현할 수 없어 새로운 파라미터를 정의하여 아래와 같이 정리하였다.

$$|\Gamma| = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2}{X_3^2 + X_4^2}} \quad (11)$$

$$\angle \Gamma = \begin{cases} \pi + \tan^{-1}(X_2/X_1) - \tan^{-1}(X_2/X_1) \\ \quad (\text{for } X_1 \cdot X_3 \geq 0) \\ 2\pi + \tan^{-1}(X_2/X_1) - \tan^{-1}(X_2/X_1) \\ \quad (\text{for } X_1 \cdot X_3 \geq 0) \end{cases} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{aligned} X_1 &= 1 + D \sin(C) t_1 + D \cos(C) t_2 \\ X_2 &= D \sin(C) t_2 - D \cos(C) t_1 \\ X_3 &= 1 - D \sin(C) t_1 - D \cos(C) t_2 \\ X_4 &= -D \sin(C) t_2 + D \cos(C) t_1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$C = \{ \tan^{-1}(\tan \delta_e) - \tan^{-1}(\tan \delta_m) \} / 2 \quad (14)$$

$$D = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r} \left( \frac{1 + \tan^2 \delta_m}{1 + \tan^2 \delta_e} \right)^{1/4}} \quad (15)$$

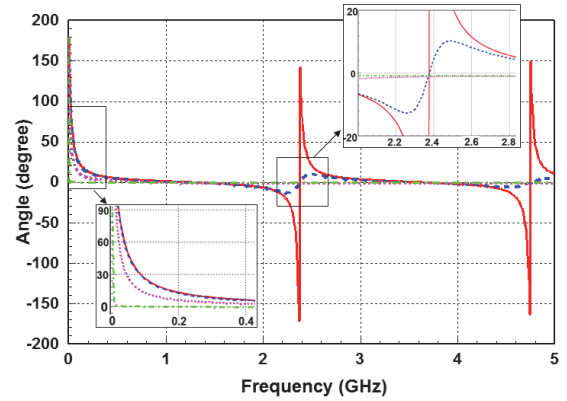
$$\begin{aligned} t_1 &= \mathcal{R} \{ \tan(\beta L) \} \\ t_2 &= \mathcal{I} \{ \tan(\beta L) \} \end{aligned} \quad (16)$$

이다.

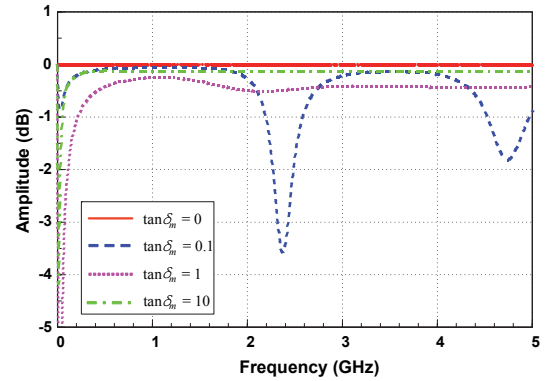
상기 수식을 이용하여  $\tan \delta_e$ 가 0일 때  $\tan \delta_m$ 에 따라 반사계수의 진폭과 위상을 그림 3에 나타냈고,  $\tan \delta_m$ 가 0일 때  $\tan \delta_e$ 에 따라 반사계수의 진폭과 위상을 그림 4에 각각 나타냈다. 이 때  $\epsilon_r$ 은 1,  $\mu_r$ 은 1000 그리고  $L$ 은 2mm로 설정했다.

그림 3에서 전계 및 자계 손실이 없는 경우( $\tan \delta_e = \tan \delta_m = 0$ ), 반사계수 위상은 약 2.4GHz와 4.8GHz에서 pole이 발생함을 볼 수 있다. 전계 손실은 없고, 자계 손실이 존재할 경우 반사계수 위상은 2.4GHz와 4.8GHz에서의 pole이 사라지며, 평평해지는 것을 볼 수 있다.  $\tan \delta_m$ 이 커질수록 반사계수 위상은 0°으로 수렴하는데,

이는 인공자계도체 동작하는 대역폭이 넓어짐을 의미한다. 특이한 점은 자계 손실이 증가함에 따라 반사계수 진폭이 0dB 아래로 되었다가  $\tan \delta_m$ 이 10이 되면 400MHz 이하에서는 큰 손실이 나타나지만, 400MHz 이상에서는 손실이 없어진다는 것이다. 이는  $\tan \delta_m$ 이 증가함에 따라  $t_1$ 은과  $t_2$ 는 ‘0’과 ‘1’로 각각 수렴하고,  $D$ 는 증가하기 때문이다.



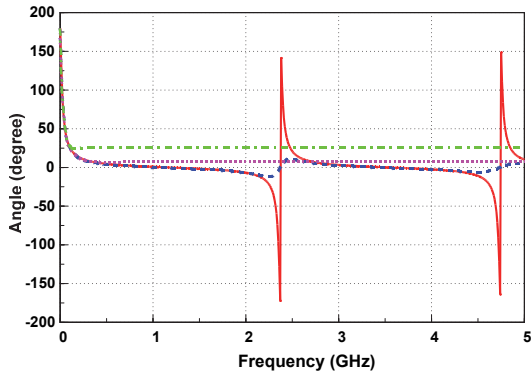
(a) Phase



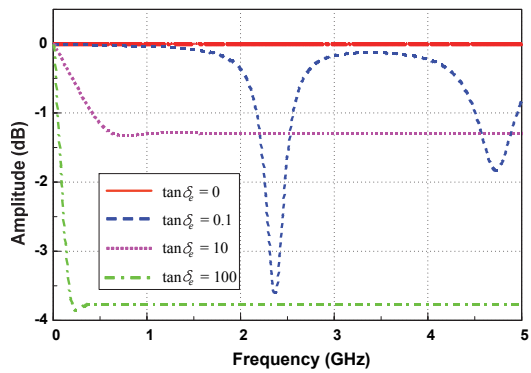
(b) Amplitude

Fig. 3. Reflection coefficient as a function of  $\tan \delta_m$ .

그림 4에서 자계 손실은 없고, 전계 손실이 있을 경우 약 2.4GHz와 4.8GHz에서 pole이 사라지며, 반사계수 평평해지는 것을 볼 수 있다. 하지만 자계 손실과 달리 전계 손실이 커질수록 반사계수 위상은 25°로 수렴하며, 반사계수 진폭은 약 -3.8dB의 값을 가진다. 이는  $\tan \delta_e$ 이 증가함에 따라  $t_1$ 은과  $t_2$ 는 ‘0’과 ‘1’로 수렴하지만  $D$ 는 작아지기 때문이다.



(a) Phase



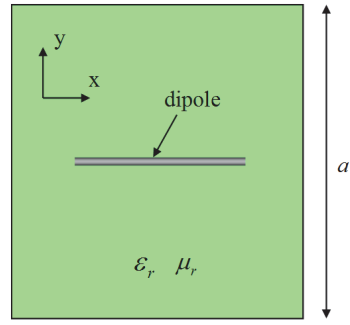
(b) Amplitude

Fig. 4. Reflection coefficient as a function of  $\tan \delta_c$ .

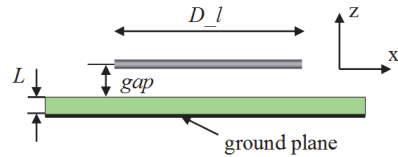
#### 4. 인공자계도체 위의 다이폴 안테나

이 절에서는 앞 절의 인공자계도체를 검증하기 위해 자유공간, 일반도체 그리고 인공자계도체 위에서 다이폴 안테나 특성을 분석하였다. 그림 5와 같이 유한한 크기의 인공자계도체 위에 다이폴 안테나를 설계하였다.

여기에서  $\epsilon_r$ 은 20,  $\mu_r$ 은 20,  $L$ 은 3mm, 그리고  $a$ 는 240mm으로 두었다. 수식 (5)와 (7)로부터 인공자계도체의 중심주파수는 1.25GHz이며, 대역폭은 100%이다. 그리고 다이폴 길이( $D_l$ )는 110mm, 반경은 1.5mm로 각각 두었다. 다이폴 길이 110mm는 인공자계도체 동작 중심 주파수에서 약  $0.458\lambda_0$ 에 해당한다. 다이폴과 인공자계도체 사이의 간격( $gap$ )은 3mm로 두었다. 다이폴이 자유공간, 일반도체, 그리고 인공자계도체에 위에 위치할 때 CST사의 Microwave(MWS)로 시뮬레이션하였고 이의 S11과 이득 패턴을 그림 6에 나타냈다.

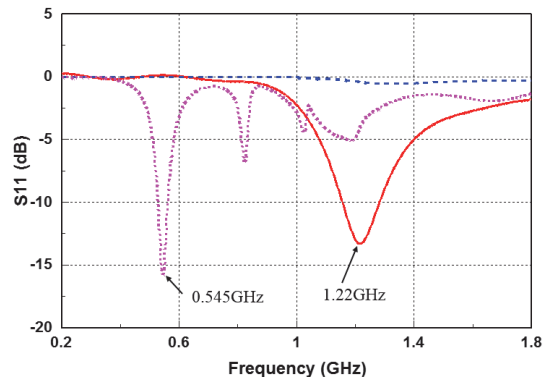


(a) Top view

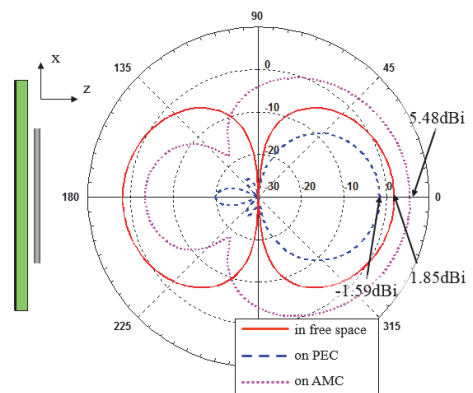


(b) Side view

Fig. 5. Configuration of dipole on the AMC



(a) S11s



(b) Gain Patterns

Fig. 6. Characteristics of 3 dipole configurations

자유공간에서 다이폴은 1.22GHz에서 동작하며 이 때 안테나 이득은 1.85dBi 이다. 이 다이폴이 일반 도체 3mm 위에 위치하는 경우 S11이 -0.5dB 이상의 값을 가지는데, 이는 다이폴에 흐르는 전류와 도체에 흐르는 전류가 흐르는 방향이 반대가 되어 안테나에서 전파가 방사 되지 않기 때문이다. 이 때 안테나 이득은 -1.59dBi이다. 반면 이 다이폴이 인공자계도체 3mm 위에 위치하는 경우에는 S11이 0.545GHz에서 약 -16dB 값을 가지며, 이득은 5.48dBi로 전파가 잘 방사된다. 0.545GHz에서 이 다이폴의 전기적 길이는  $0.2\lambda$ 으로 소형화되었음을 알 수 있다. 이 3가지 구성의 다이폴 이득 패턴을 그림 6(b)에 나타냈으며, 그림에서 볼 수 있듯이 다이폴과 같이 전방향성 안테나를 인공자계도체 위에 올려놓음으로써 안테나의 지향성을 향상시키는 효과도 얻을 수 있다.

인공자계도체의 유전율과 투자율이 다이폴의 S11에 미치는 영향을 분석하기 위해 유전율 투자율 값을 변화

시키면서 다이폴 S11과 인공자계도체 반사계수 위상을 시뮬레이션하였고 이를 그림 7에 나타냈다.

그림 7(a)에서 4개의 유전율 투자율 조합 [ $\epsilon_r=20, \mu_r=10$ ], [ $\epsilon_r=10, \mu_r=30$ ], [ $\epsilon_r=30, \mu_r=10$ ], [ $\epsilon_r=10, \mu_r=10$ ]에 따른 안테나 동작 주파수는 0.54GHz, 0.51GHz, 0.65GHz, 0.70GHz임을 볼 수 있고, 이 주파수에서 안테나 이득은 5.12dBi, 5.48dBi, 2.32dBi, 2.13dBi으로 시뮬레이션 되었다. 그림 7(b)에서 다이폴 안테나 동작 주파수에서 인공자계도체의 반사계수 위상은  $100^\circ, 83^\circ, 120^\circ$ , 그리고  $124^\circ$ 임을 볼 수 있다. 다이폴의 경우 동작 주파수에서 요구되는 인공자계도체의 반사계수 위상은 약  $90^\circ$ 임일 밝혀져 있다(Yang et al, 2003). 다이폴 동작 주파수에서 인공자계도체 반사계수 위상이  $90^\circ$ 에 가까운 [ $\epsilon_r=20, \mu_r=10$ ], [ $\epsilon_r=10, \mu_r=30$ ] 조합의 인공자계도체 위의 다이폴 안테나의 이득이 높는데, 이는 참고문헌 Yang et al의 시험 결과와 잘 부합된다.

[ $\epsilon_r=20, \mu_r=10$ ]의 인공자계도체의 동작 주파수는 1.25 GHz이고, 안테나 동작 주파수는 0.51GHz이다. [ $\epsilon_r=10, \mu_r=30$ ]의 인공자계도체의 동작 주파수는 1.44GHz이고, 안테나 동작 주파수는 0.54GHz이다. 이는 인공자계도체의 유전율과 투자율을 변경하여 다이폴의 동작 주파수를 변경할 수 있음을 의미하며, 향후 평면형 reconfigurable 안테나로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### 5. 결론

이 논문에서는 도체 위에 물질의 유전율과 투자율 변화에 따른 인공자계도체 특성을 수식을 유도하여 분석하였다. 물질의 손실이 없는 경우 투자율이 높을수록 인공자계도체의 대역폭은 증가하며, 유전율이 높을수록 대역폭은 감소한다. 그리고 유전율과 투자율 곱이 커질수록 인공자계도체의 두께는 낮아짐을 확인했다. 물질의 손실이 존재하는 경우 매우 특이한 현상을 알아냈는데, 반사계수 위상의 pole이 사라지며 위상 곡선이 평평하게 됨을 밝혀냈다. 투자율 손실이 클 경우 인공자계도체 반사계수의 위상 대역폭이 증가하며 진폭에는 영향을 미치지 않는 반면, 유전율 손실이 클 경우에는 반사계수의 크기가 줄어드는 것을 확인했다.

자유공간의 다이폴, 도체위의 다이폴, 인공자계도체 위에 다이폴을 설계하고 그 특성을 비교 분석했다. 다이폴이 인공자계도체에 매우 근접해도 안테나로 잘 동작함을 확인했다. 다이폴의 동작 주파수와 인공자계도체 동작 주파수 관계를 규명하기 위해 인공자계도체의 유전율과

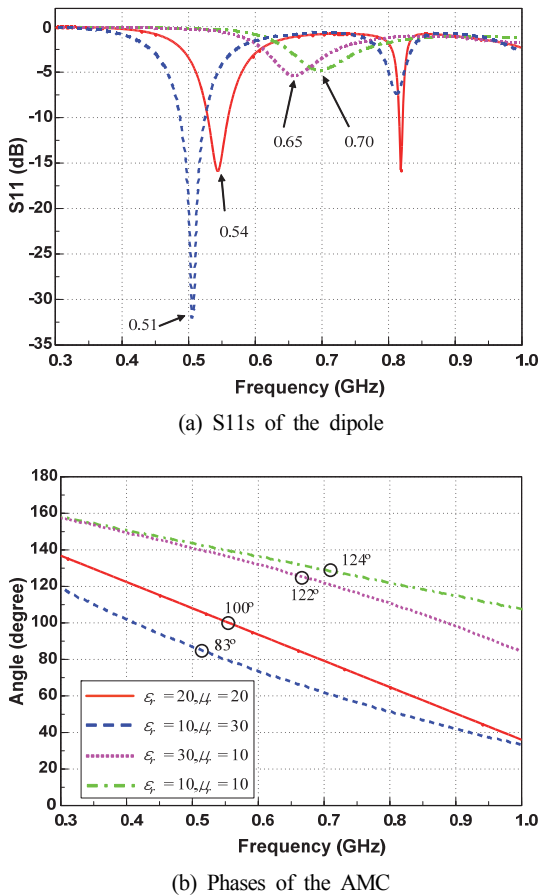


Fig. 7. Characteristics for different pairs of  $\epsilon_r$  and  $\mu_r$



투자율을 변경하면서 시뮬레이션을 수행했다. 인공자계도체의 반사계수 위상이 약 90° 부근에서 안테나 동작하는 것을 확인했다. 안테나가 인공자계도체 위에 위치할 경우 투자율이 높을수록 안테나 동작 대역폭은 증가하는 것을 확인했다.

현 시점에서 넓은 주파수 대역에서 일정한 유전율 및 투자율을 가지는 물질은 실제에는 존재하지 않아 실제 응용으로 바로 적용하기에는 어려움이 있다. 하지만 본 논문에서 유도한 수식과 인공자계도체의 특성은 인공자계도체를 이해하는데 큰 도움이 되며 좁은 주파수 대역에서 응용 사례는 다양할 것으로 예상된다.

## References

- V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Sov. Phys. Usp.*, vol.10, no.4, pp.509-514, 1968.
- D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Phys. Rev. Lett.*, vol.84, p.4184, 2000.
- R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science*, vol.292, no.5514, pp.77-79, Apr. 6, 2001.
- C. Caloz, C.-C. Chang, and T. Itoh, "Full-wave verification of the fundamental properties of left handed materials in waveguide configurations," *J. Appl. Phys.*, vol.90, no.11, pp.5483-5486, Dec. 2001.
- D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolus, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp.2059-2074, Nov.1999
- A. Erentok, P. Luljak, and R. W. Ziolkowski, "Antenna performance near a volumetric metamaterial realization of an artificial magnetic conductor," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.53, no.1, pp. 160-172, Jan. 2005.
- R. Liu, Y. Qin, F. Li, L. Wu, and Y. Chi, "AMC surface based on spiral strips and its applications for low-profile broadband planar antennas," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol.13, Iss.3, pp.326-333, 2018.
- M. Fujii, Y. Inuzuka, and K. Watanabe, "Novel Subwavelength Magnetic Conductor Surface of Lumped Element Electrical Network," *IEEE Microw. and Wireless Components Letters*, Vol.29, No.9, 2019.
- S. Yan, P. J. Soh, and G. A. E. Vandenbosch, "Low-profile dual-band textile antenna with artificial magnetic conductor plane," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.62, no.12, pp.6487-6490, Dec. 2014.
- M. Mantash, A.-C. Tarot, S. Collardey, and K. Mahdjoubi, "Design methodology for wearable antenna on artificial magnetic conductor using stretch conductive fabric," *Electron. Lett.*, vol.52, no.2, pp.95-96, Jan. 2016.
- A. Alemarveen, and Sima Noghianian, "On-Body Low-Profile Textile Antenna With Artificial Magnetic Conductor," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.67, no.6, pp.3649-3656, JUN. 2019
- L. Yousefi. B. M. Iravani, and O. M. Ramahi, "Enhanced Bandwidth Artificial Magnetic Ground Plane for Low-Profile Antennas," *IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett.*, vol.6, pp.289-292, Jun. 2003.
- A. Jafargholi, M. Kamyab, and M. Veysi, "Artificial Magnetic Conductor Loaded Monopole Antenna," *IEEE Trans., Antennas Propagat.*, vol.9, pp.211-214, 2010.
- K. Agarwal, Nasimuddin, and A. Alphones. "Wideband circularly polarized AMC reflector backed aperture antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2013, 61, (3), pp. 1456-1461
- Feng, D., Zhai, H., Xi, L., et al.: 'A broadband low-profile circular-polarized antenna on an AMC reflector', *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2017, 16, pp.2840-2843
- F. Yang, and Y. Rahmat-Samii, "Reflection Phase Characterizations of the EBG Ground Plane for Low Profile Wire Antenna Applications," *IEEE Trans., Antennas Propagat.*, vol.51, pp. 2691-2703, Oct. 2003.



**이 동 현** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1440-3364> / donghyun@add.re.kr)

2002 아주대학교 전자공학부 학사  
2007 Loughborough University, Wireless Communication Research Group, 방문연구원  
2009 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 전자장 및 초고주파 전공 석·박사  
2013 삼성전자 무선사업부, 책임연구원  
2013~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 유도무기체계, 초고주파 회로, 무선 통신



**민 태 홍** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-2832-1263> / mth1210@add.re.kr)

2012 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학 학사  
2014 KAIST 전기 및 전자공학 석사  
2014~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 유도무기체계, 모델링&시뮬레이션



**이 종 무** (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-5616-0407> / mirror@add.re.kr)

1991 충남대학교 컴퓨터공학과 학사  
1996 충남대학교 컴퓨터공학과 석사  
1996~ 현재 국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 데이터마이닝, 모델링&시뮬레이션