

극초음속 플라즈마 환경에서의 통신두절 극복을 위한 메타물질 구현

Metamaterials Resolving Communication Blackout
within Hypersonic Plasma Environment정 성 훈¹ · 김 수 연² · 권 호 영³Seonghoon Jeong¹ · Suyeon Kim² · Hoyeong Kwon³

요 약

극초음속 비행체의 통신두절은 대기가스가 이온화하는 극한의 환경에 비행체가 노출될 때 발생한다. 이온화한 대기 가스와 방출된 전자의 밀도가 플라즈마 밀도를 초과하면, 가스 매질은 유전율의 실수부가 음수로 변환되는 전도율을 가진다. 이러한 물질은 음의 유전율(ENG: epsilon-negative)을 가지는 물질로 분류되며, 큰 감쇠상수로 아주 얇은 두께의 매질에서도 대부분의 전자파가 흡수 및 반사된다. 본 연구에서는 플라즈마층 후면에 음의 투자율(MNG: mu-negative)을 가지는 물질을 적용하여 플라즈마층에 대해 100 % 투과율을 달성하는 MNG 메타물질을 제안, 다층 구조에서의 투과율과 반사율을 입사각과 주파수의 함수로 유도하여 MNG 물질을 반영할 경우, 반영하지 않을 경우와 비교해 4배 높은 투과율을 달성하였다. 본 연구의 결과는 극초음속 환경에서 MNG 메타물질이 통신두절 현상 극복에 유용한 지 이론적으로 검증한 결과로 MNG 메타물질의 설계 및 응용 분야에 적용할 수 있는 기반 연구가 될 것이다.

Abstract

Communication blackout of hypersonic flights refers to an interruption in communication when a flight enters an extreme environment of atmospheric gas ionization. Specifically, as the ionized gas and electron density goes over the plasma density, the gas medium becomes conductive, where the conductivity can be translated into a permittivity with a negative real number. The resulting class of material can be characterized as an ENG (Epsilon-Negative) material, which induces a significant decaying constant and absorbs or reflects most of the electromagnetic waves, even within an ultrathin layer. In this study, we propose MNG (Mu-Negative) metamaterials that achieve complete transmission through the layering of the MNG material after the plasmonic layer. Moreover, we calculated the transmittance and reflectance of multilayers as a function of incident angle and frequency to prove that transmittance can be improved by x4 larger with the MNG material in aerospace conditions. This study is the result of theoretical analysis proving the usefulness of MNG metamaterials and can be regarded as a fundamental study that can be applied in the development of MNG metamaterials or real-life applications.

Key words: Hypersonic, Communication Blackout, Metamaterials, Complex Conjugate Match, Omnidirectional Incidence

「이 연구는 2021년 한국연구재단(NRF-2021M3A6B3037629)과 2022년 한국연구재단(NRF-2022R1G1A1010416)의 일부 지원으로 연구되었음.」

공군사관학교 전자통신공학과(Department of Electrical and Communication Engineering, Republic of Korea Air Force Academy)

1: 학부생, 공동주저자(<https://orcid.org/0000-0002-5512-3775>), 2: 학부생, 공동주저자(<https://orcid.org/0000-0002-6874-2647>),

3: 조교수, 교신저자(<https://orcid.org/0000-0002-3681-1767>)

· Manuscript received November 15, 2021 ; Revised December 7, 2021 ; Accepted February 24, 2022. (ID No. 2021115-006S)

· Corresponding Author: Hoyeong Kwon (e-mail: hoyeong3958@gmail.com)

I. 서 론

메타물질은 자연계에 존재하지 않는 특이(peculiar) 현상을 일으키는 물질로 전기적 특성인 유전율과 투자율의 비이상적 변조를 통해 음의 굴절, 광대역 전자파 흡수, 시간 변조를 통한 비가역적 시스템 설계 등 다양한 목적으로 연구되었다. 본 연구에서는 극초음속 환경에서 발생하는 통신두절 현상을 해결하기 위해 음의 투자율(MNG: μ -negative)을 가지는 MNG 메타물질을 이론적으로 설계하였다. 극초음속 비행체는 음속(343 m/s, 상온-대기압) 다섯 배 이상의 속도로 비행하는 비행체로 정의되는데, 이때 높은 비행 속도로 인해 비행체를 감싸고 있는 대기가 $2,000^{\circ}\text{C} \sim 4,000^{\circ}\text{C}$ 로 가열, 대기 중 N_2 와 O_2 의 다중결합이 분해되어 대기가 플라즈마화된다. 플라즈마 기체는 높은 전도율을 띄며, 이는 음의 유전율을 가지는 ENG (epsilon-negative) 물질로 해석되는데, ENG 물질은 높은 감쇠상수를 가져 전자파가 대기에서 물질로 입사할 때 대부분의 입사에너지가 반사 및 흡수된다.

플라즈마층은 비행체 전단부를 중심으로 형성되어 다양한 각도에서 입사하는 전자파가 비행체 표면 또는 내부 안테나로 도달하는 것을 차단, 비행체와 교신소 간 통신을 저해하는 주요한 요인이다^[1]. 이러한 통신차단을 해결하기 위해 여러 연구가 진행되었는데, 첫 번째는 기체의 형상을 변형하여 전단부의 플라즈마층 형성을 최소화하는 것이다. 그러나 이 방법은 비행체의 변형으로 주요 목적인 비행능력이 소실되는 한계가 있다. 두 번째로 비행체의 안테나 후면에 두꺼운 전자석을 배치하는 방법이 제안되었으나, 500 kg에 달하는 전자석을 비행체에 탑재하는 것에는 한계가 있었다^[2].

본 연구에서는 플라즈마층과 맞닿아 있는 비행체 전단부를 투자율의 실수부가 음수인 MNG 메타물질^[3]로 구성하여 비행체 모양의 변형 또는 추가적인 시스템의 요구 없이, ENG 물질의 손실을 고려하였을 때도 높은 효율로 전자파를 투과시켜 통신두절을 극복하는 연구를 수행하였다. 첫 번째로 무손실 ENG층에 대해 100 % 투과를 달성하는 MNG 메타물질의 조건을 유도, 입사파가 0° 에서 90° 에 걸쳐 100 % 투과율을 달성할 수 있음을 이론적으로 증명하였으며, 다음 단계로 Drude 모델을 통해 실제

플라즈마의 유전율을 유도^[1], MNG 메타물질을 이용해 플라즈마층에 대한 투과율을 증가시켜 통신두절 현상을 극복할 수 있음을 증명하였다.

II. 이론분석

전자파가 외부로부터 비행체 표면에 형성된 플라즈마층을 투과하여 비행체 내부 안테나로 전달되는 모델을 단순화하기 위해 그림 1(a)와 같이 비행체 내부와 외부를 자유공간(I, IV)으로 대체, 플라즈마 상태인 ENG층(II)과 비행체인 MNG 메타물질(III)을 자유공간 사이에 위치시켰다. 자유공간(I)에서 플라즈마층(II)으로 입사하는 전자파는 전파상수 \vec{k} 를 가지며, 본 논문에서는 TM(transverse-magnetic)편광 입사파에 대해 논한다.

자유공간(I)에서 자유공간(IV)로의 반사율과 투과율을 유도하기 위해 각 층에서 경계조건을 수립, 풀이하였으며, 그 결과로 반사율과 투과율을 식 (1)과 식 (2)로 유도하였다. 그림 1(a)에서 ENG층과 MNG층의 유전율과 투자율은 각각 $[\epsilon_{eng}, \mu_{eng}]$, $[\epsilon_{mng}, \mu_{mng}]$ 로 정의하였으며, 이때 ϵ_{eng} 는 Drude 모델에 의해 그림 1(b)와 같이 유도하였다^[1].

$$R = 1 - (C_{eng+}^{TM} + C_{eng-}^{TM}) \quad (1)$$

$$T = X_{const} [C_{mng+}^{TM} e^{-\sqrt{k_x^2 - k_{mng}^2} d_2} + C_{mng-}^{TM} e^{+\sqrt{k_x^2 - k_{mng}^2} d_2}] \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에서 C_{eng+}^{TM} 와 C_{eng-}^{TM} 는 ENG층에서의 입사파와 반사파의 비율을, C_{mng+}^{TM} 와 C_{mng-}^{TM} 는 MNG층에서의 입사파와 반사파의 비율을 뜻하며, X_{const} 는 상수 $\sqrt{k_x^2 - k_{mng}^2} / j\epsilon_{mng}\sqrt{k_0^2 - k_x^2}$ 로 정의된다. 또한 d_1, d_2 는 각

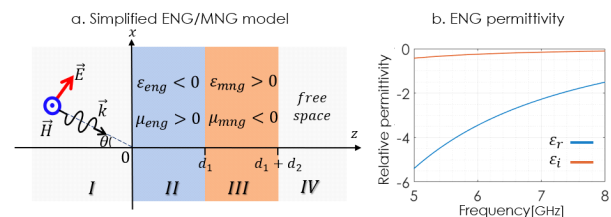


그림 1. (a)이론연산 모델, (b)플라즈마(ENG)의 상대유전율
Fig. 1. (a) Theoretical model, (b) relative permittivity of plasma (ENG) layer.

각 ENG, MNG층의 두께, k_n , k_x 는 매질 n 에서의 전파상수와 x 축 방향의 전파상수를 의미하며, θ 는 입사각이다.

그림 2는 ENG층($[\epsilon_{eng}, \mu_{eng}] = [-2.77, 1]$)과 이에 대해 공액복소대칭을 만족하는 MNG층($[\epsilon_{mng}, \mu_{mng}] = [2.77, -1]$) 구조에 수직 입사하는 전자파의 포인팅 벡터로 ENG층의 유전율은 그림 1(b)의 설계주파수 $f=6.5$ GHz 값을 대입하였다^[3]. 그림에서 입사한 전자파가 z 축을 따라 ENG층을 투과할 때 포인팅 벡터의 절대값이 점점 증가하다가 MNG층에 진입할 때 크기가 줄어들며, 100 % 투과하는 것을 확인할 수 있다. 이때 ENG층과 MNG층 사이에서 포인팅 벡터 허수부의 크기가 증가하는 것은 층 사이에 에너지가 저장되는 것을 뜻한다.

그림 3(a)는 비행체 전단부에 전자파가 입사하는 것을 묘사한 그림으로 내부 안테나가 높은 효율로 전자파를 수신하기 위해서는 입사표면에 대해 높은 각도로 입사하는 전자파에 대한 고려가 필수적임을 알 수 있다. 이에 식 (1)과 식 (2)를 입사각에 대해 풀이한 결과, 그림 3(b)의 빨간색 실·점선에서 보는 것과 같이 공액복소대칭을 만족할 때, 모든 입사각에 대해 투과율 100 %, 반사율 0 %를 달성하는 것을 확인할 수 있었다. 파란색과 초록색 실·점선은 다양한 조건에 대한 투과율과 반사율을 입사각에 대한 함수로 도시한 그림이다. 파란색 실·점선은 $[\epsilon_{eng}, \mu_{eng}] = [-3, 2]$, $[\epsilon_{mng}, \mu_{mng}] = [60, -45]$ $d_1 = 4\pi/4.8 |k_{eng}|$, $d_2 = 4\pi/4.5 |k_{mng}|$ 일 때의 투과율과 반사율이며, 초록

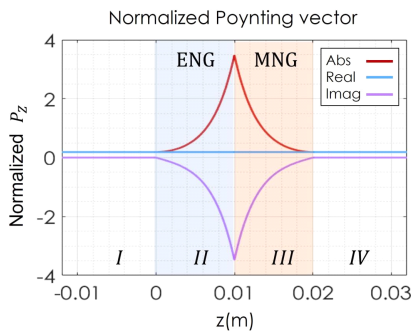


그림 2. $d_1 = d_2 = 0.01$ m이며 ENG와 MNG의 투자율과 유전율이 공액복소대칭일 때 z 축 방향으로의 포인팅 벡터 \vec{P}_z

Fig. 2. $d_1 = d_2 = 0.01$ m, \vec{P}_z when ENG and MNG satisfy complex conjugate matching.

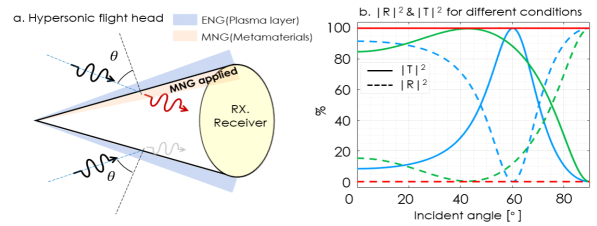


그림 3. (a) 비행체 전단부와 안테나, (b) 서로 다른 조건을 가지는 ENG와 MNG에 대한 투과율과 반사율
Fig. 3. (a) Description of the flight head and antenna, (b) transmittance and reflectance with different condition of ENG and MNG.

색 실·점선은 $[\epsilon_{eng}, \mu_{eng}] = [-3, 2]$, $[\epsilon_{mng}, \mu_{mng}] = [3.5, -2.4]$, $d_1 = 4\pi/4.8 |k_{eng}|$ 및 $d_2 = 4\pi/4.9 |k_{mng}|$ 일 때의 투과율과 반사율을 계산한 것이다. 그림에서와 같이 임의의 ENG, MNG 조건과 각 층이 서로 다른 두께를 가질 때, 특정 입사각에서 반사율이 0 %, 투과율이 100 %인 것을 관찰할 수 있는데, 이는 TM 입사파가 다른 매질의 경계에 입사할 때 나타나는 Brewster effect로 인한 100 % 투과율이다.

입사각에 대한 반사율과 투과율 분석을 통해 공액복소대칭을 완벽하게 만족하지 않거나, ENG와 MNG의 전기적 성질이 크게 차이가 나더라도 $0^\circ \sim 70^\circ$ 에서 50 % 이상의 투과율을 달성하는 것을 확인하였으며, 이를 통해 극초음속과 같은 가변적인 환경에서도 해당 이론분석 결과를 적용할 수 있음을 증명하였다.

마지막으로, 제안한 MNG 메타물질이 실제 극초음속 환경에서 통신두절 현상을 극복할 수 있는지를 확인하기 위해 손실이 포함된 ENG층을 이론 모델에 적용하였다. ENG층의 유전율은 설계주파수 $f=6.5$ GHz에서 $\epsilon_{eng} = -2.77 - 0.2j$ 이며, MNG층의 유전율은 공액복소대칭 조건을 만족함과 동시에 같은 크기의 손실을 부과하였다. ENG층의 투자율은 $\mu_{eng} = 1$ 이다. 그림 4에는 MNG 메타물질의 효율성을 검증하기 위하여 각각 손실상태와 무손실 상태에서 MNG층의 투자율 변화에 따른 투과율을 MNG층이 존재하지 않는 경우와 비교하여 도시하였다.

그림 4(a)는 무손실 상태(유전율과 투자율의 허수부를 고려하지 않음)에서 모든 입사각에 대한 투과율을 계산한 그래프로, 두 층의 두께가 각각 0.01 m이고, $[\epsilon_{eng}, \mu_{eng}]$

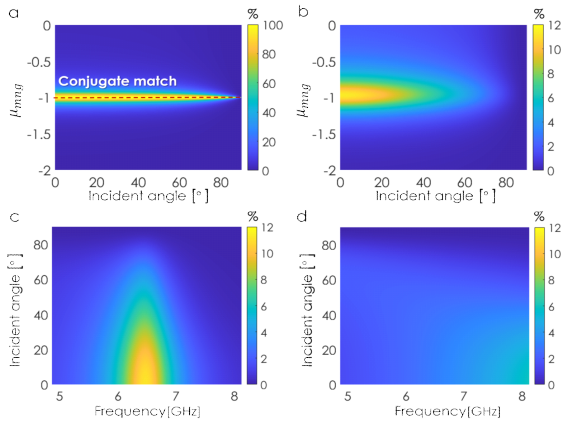


그림 4. (a) 무손실 ENG 매질에서의 투과율, (b) 손실이 있는 매질에서의 투과율, (c) 주파수에 대한 투과율, (d) MNG층 물질을 반영하지 않았을 때 투과율

Fig. 4. (a) Transmittance with lossless ENG, (b) transmittance with lossy ENG, (c) transmittance in frequency axis, (d) transmittance without MNG layer.

$= [-2.77, 1]$, $\epsilon_{mng} = 2.77$ 일 때 공액복소대칭 조건에 의해 μ_{mng} 이 -1 에 근접함에 따라 100 %의 투과율을 달성하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 실제 비행체 전단부에 생성되는 플라즈마층을 고려하여 손실이 있는 ENG층 후면에 MNG층을 위치시켰을 때의 투과율을 유도하였다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 무손실 결과에 비해 낮은 투과율을 달성하였으나, 0° 에서 40° 의 입사각에 대해 10 % 이상의 투과율을 안정적으로 달성하였으며, $\theta = 0^\circ$ 에서는 최대 12 %의 투과율을 달성하였다.

그림 4(c)는 ENG층의 유전율이 주파수상에서 그림 1(b)의 Drude 모델을 따라 변화하고, MNG층의 유전율과 투자율은 설계주파수 $f=6.5$ GHz에서 공액복소대칭을 만족할 때, 주파수와 입사각에 대한 투과율을 도시한 그래프이다. 그림 4(b)와 같이 설계주파수에서 가장 높은 투과율을 달성하며, 주파수가 변화하더라도 약 1 GHz에서 최대투과율의 절반에 가까운 투과율을 달성하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(d)는 ENG층 뒤에 MNG층이 아닌 대기가 존재할 때의 투과율로, 설계주파수에서 약 3 %의 투과율을 달성하나, 그림 4(c)와 비교 대비했을 때 투과율이 4배 작은 것을 볼 수 있다.

본 연구의 결과로부터 저자는 비행체의 전단부를 MNG 메타물질로 구성할 때, ENG층의 높은 손실을 극복하고 통신두절 현상을 극복할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구의 후속 연구는 해당 이론을 기반으로 하여 MNG 메타물질을 구체화 및 설계하는 연구이며, ENG층이 음의 유전율과 동시에 1이 아닌 투자율을 가질 경우를 포함하여 통신두절 현상을 극복하는 MNG 메타물질 구현을 목표로 한다.

III. 결 론

본 연구에서는 음의 투자율을 가지는 MNG 메타물질을 극초음속 비행체에 적용, 통신두절을 극복하는 것이 가능한가를 이론적으로 검증하였다. 먼저, 무손실 상태에서 임의의 유전율(ϵ)과 투자율(μ)을 가지는 ENG/MNG 모델에 대한 반사율과 투과율을 공학적으로 계산하여 공액복소대칭 조건에서 전체 입사각에 대해 100 % 투과율을 달성하였으며, 그 외의 다양한 조건에서도 Brewster angle에서 100 % 투과율을 달성하였다. 다음으로 손실이 있는 ENG에 대한 투과율을 입사각과 MNG 투자율 등 다양한 변수에 대한 함수로 분석하여 MNG를 반영하지 않을 경우와 비교해 최대 4배 우수한 투과율을 달성, MNG 메타물질이 극초음속 환경의 통신두절 현상을 극복하는데 적합하다는 것을 증명하였다. 연구자는 이 연구의 결과를 바탕으로 통신 주파수 대역에서 비행체에 적용할 수 있는 MNG 메타물질을 설계 및 개발하고자 한다.

References

- [1] N. Mehra, R. K. Singh, and S. C. Bera, "Mitigation of communication blackout during re-entry using static magnetic field," *Progress in Electromagnetic Research B*, vol. 63, pp. 161-172, 2015.
- [2] M. K. Kim, "Electromagnetic manipulation of plasma layer for re-entry blackout mitigation," Ph.D. dissertation, University of Michigan, pp. 13-19, 2009.
- [3] A. Alù, N. Engheta, "Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: Resonance, tunneling and transparency," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10, pp. 2558-2571, Oct. 2003.