

금속과 왼손잡이 메타-물질의 경계면에서 형성되는 표면 플라리톤의 전파 특성

윤재웅 · 송석호[†] · 오차환 · 김필수

한양대학교 물리학과, 마이크로 광학 국가지정 연구실
Ⓣ133-791 서울특별시 성동구 행당동 17

(2003년 11월 6일 받음, 2004년 1월 30일 수정본 받음)

금속에서의 흥미로운 광학적 특성들은 주로 표면 플라리톤(surface polaritons: SP)의 기여에 의해 나타난다. 물질상수(유전율과 투자율)가 모두 음수인 왼손잡이 물질(left-handed materials: LHM)의 표면에서도 두 종류의 SP인 표면 전기-플라리톤(surface electric-polariton: SEP), 또는, 표면 자기-플라리톤(surface magnetic-polariton: SMP)이 형성되어 군속도와 위상속도가 서로 반대되는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 금속물질과 LHM와 같은 메타물질(metamaterials)의 경계면에서 발생하는 SP의 전파특성을 분산관계를 통하여 분석하였다. 임의의 물질상수를 갖는 두 매질의 경계면에서 SEP와 SMP가 생성될 수 있는 일반화된 조건을 도출하였으며, 양쪽 매질을 통해 전파하는 에너지 비율의 차이에 의해 군속도와 위상속도가 반대된다는 물리적인 원인을 제안하였다. 도출된 SP 생성조건을 이용하여 금속물질과 메타물질의 경계면에서 전파하는 SEP와 SMP의 분산관계를 구하고, 주파수에 따라 다양한 SP의 전파특성이 나타날 수 있음을 보였다. SEP 및 SMP 분산관계로부터 구한 정량화된 전파특성은 SP가 존재하기 위한 매질의 일반화된 조건과 에너지 전파 비율의 계산으로부터 얻은 결과와 일치함을 확인하였다. 특히, 두 매질 중 어느 한 매질이 LHM이 아니더라도 SP는 위상속도와 군속도가 반대되어 전파될 수 있음을 밝혀내었다.

주제어 : surface polariton, metal, metamaterial, left-handed material, group velocity inversion.

I 서 론

전자기파의 전파(propagation)에 대해서 음의 유전율(negative permittivity), 혹은, 음의 투자율(negative permeability)을 가지는 매질은 양의 값을 가지는 유전체와 비교했을 때, 전자기파의 전파를 보다 효율적으로 제어할 수 있는 재료가 될 수 있다. 이는 음의 물질 상수를 가지게 되는 물리적인 원인이 매질을 이루고 있는 미시적인 원소들의 전자기적 공명이 라는 사실로부터 기인한다. 즉, 음의 물질 상수를 가진다는 것은 전자기파와 매질이 강하게 상호 작용한다는 것을 뜻한다. 금속 안에서의 자유전자와 같이 자유전자 집단을 품고 있는 매질은 주파수 0인 정전기장에 대해 공명을 나타내며 플라즈마 주파수 이하의 저주파 영역에서는 음의 유전율을 가진다. 플라즈마 주파수는 대부분의 금속물질에서 자외선 영역에 위치하기 때문에 정전기장에서부터 가시광선 영역까지 금속의 유전율은 음수가 된다.^[1] 이것은 금속으로 이루어진 전선을 통해 저주파(수 GHz 이하)의 전자기파가 잘 속박되어 효과적으로 전파될 수 있는 원인이기도 하다. 광학 주파수 영역에서 금속은 큰 감쇠 손실을 나타내기 때문에 도파소자를 위한 재료로 사용되지는 않는다. 그러나, 감쇠손실을 정량적으로 배제할 수 있을 만큼 얇은 박막 금속 구조에 대한 빛의 회절, 투과에 대해서는 유용한 광학적 특성이 나타난다. 표면센서와^[2,3] 비선형 효과의 증폭과^[4] 같은 응용들은 금속 표면에서 이루어지는 빛의 표면 속박과 그에 따른 표면

강도 강화를 기본으로 하여 나타나는 것들 이다. 최근에는 파장 이하의 주기를 가지는 패턴을 금속 박막에 구성함으로써 투과 강도가 높아지는 현상과,^[5,6] 파장 이하의 개구(aperture)로부터 빛이 방향성을 가지고 투과하는 현상이^[7] 보고되어, 수 마이크로 미터의 규모로서 반도체 발광소자(LED, LD)로부터 빛을 효과적으로 끄집어 내는 등 많은 기술적 응용이 기대되고 있다.

이와 같이 금속 박막 구조가 유용한 광학적 성질을 나타내는 물리적 원인은 표면 플라리톤(surface polariton: SP)의 역할이 핵심을 이룬다. 빛의 표면 속박과 관련한 것들은 비-방사(non-radiative) SP 모드에 의해 나타나는 현상이며,^[8] 금속 주기 구조에서의 투과와 관련된 현상들은 새는(leaky) SP 모드가 주도적인 역할을 한다.^[9-12] 따라서, 금속의 유전율이 음수이고 감쇠 손실이 상당히 존재하는데도 불구하고, 금속 박막에서는 SP의 기여에 의해 감쇠 손실의 효과를 배제할 수 있는 유용한 특성을 나타낼 수 있는 것이다. 일반적으로, 유전율이나 투자율이 음의 값을 가지게 되는 물리적인 원인이 매질의 전자기적인 공명에 의한다는 것은 공명 흡수에 의한 손실을 동반한다는 것을 의미한다. 매질이 전자기적 공명의 효과가 주도적일 때 물질 상수는 큰 주파수 분산을 가지게 되며, 그렇게 되면 매질의 전자기적인 응답이 인과율을 만족하기 위해, 또는, Kramers-Kronig 관계에 의해, 물질 상수의 허수부분이 무시할 수 없게 되어 상당한 수준의 감쇠 손실을 가지게 된다.^[13] 특히, 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 가지도록 '전자기적인 공명 원소를 인공적으로 구성한 물질'—이를 메타물질(metamaterials)이라 한다—인 왼손잡이 물

[†] E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

질(left-handed materials: LHM)^[14,15]에서는, 음의 물질상수에 의해 감쇠 손실은 필연적이라고 할 수 있다.^[16,17] 따라서, LHM은 기본적으로 박막의 형태를 가지는 것이 실용적인 측면에서 보다 바람직하다고 할 수 있으므로, LHM에서의 SP 전파특성을 분석하는 것은 매우 의미 있는 연구주제이다.

SP의 생성원인은 음의 물질상수를 갖는 매질의 표면에 존재하는 전기-쌍극자(electric dipole), 또는, 자기-쌍극자(magnetic dipole)의 집단적인 진동에 있다. 전기 쌍극자의 진동으로 형성되는 SP은 유전율이 음수인 매질을 따라 전파하며 경계면과 수직인 입사면에 대해서 TM-편광을 가지는데, 이를 표면 전기-플라리톤(surface electric-polariton: SEP)이라 한다. 한편, 자기 쌍극자의 진동으로 야기되어 음의 투자율을 갖는 매질을 따라 전파는 TE-편광된 SP를 표면 자기-플라리톤(surface magnetic-polariton: SMP)이라 한다.^[18] LHM에서는 두 물질 상수가 동시에 음의 값을 가지기 때문에 SEP와 SMP가 모두 나타나게 되며, 박막 형태의 LHM이 가지는 광학적인 특성의 많은 부분은 SEP와 SMP에 의해 결정되게 된다. 자유-공간(free-space)과 LHM의 경계면에서 생성되는 두 종류의 SP(SEP와 SMP) 특성과, 감쇠 전반사(attenuated total reflection) 스펙트럼에서 이들 SP에 해당하는 공명 흡수선이 존재한다는 것은 이미 보고 되어있다.^[19,20,21] 자유-공간과 접해있는 반-무한(semi-infinite) LHM 매질과 얇은 평판 모양의 LHM 표면에서 나타날 수 있는 단거리 및 장거리 SP에 대한 분산 특성 및 반사도 스펙트럼과, LHM의 매우 흥미로운 특성인 위상속도(phase velocity)와 군속도(group velocity) 간의 반전현상이 SP에 대해서도 나타난다는 사실이 발표되었다. 만일, LHM과 인접해 있는 매질이 금속인 경우에는 SP의 분산 특성이 자유-공간과 같은 양의 유전율을 갖는 보통의 유전체와는 매우 다를 것으로 예측된다. 즉, 금속의 상대 유전율이 주파수에 따라서 양수와 음수를 모두 가질 수 있기 때문에, LHM과 같은 메타물질과 금속이 접해있는 경우에는 SEP와 SMP 전파에 관한 분산특성이 매우 다양하고 보다 일반화된 형태를 가질 것이다. 따라서 금속과 메타물질의 접합으로 이루어진 경계면은 양쪽 매질의 주파수 의존을 적절히 조절함으로써 특정한 조건의 전파특성을 가지는 SP가 형성될 수 있도록 지원하는데 보다 많은 융통성을 가질 수 있다.

SP 분산관계(dispersion relation)의 계산과 분석을 단순화하기 위해, 메타물질의 상대 유전율(ϵ_L)과 상대 투자율(μ_L)이 갖는 주파수 의존성을 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\epsilon_L(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\gamma_p)} \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1)$$

$$\mu_L(\omega) = 1 - \frac{\omega_m^2}{\omega(\omega - i\gamma_m)} \approx 1 - \frac{\omega_m^2}{\omega^2} \quad (2)$$

ω_p 와 ω_m 은 각각 전기-플라즈마 주파수(electric-plasma frequency), 자기-플라즈마 주파수(magnetic-plasma frequency)이고, γ_p 와 γ_m 은 감쇠상수이다. 위의 수식에서 유전율과 투자율의 허수 부분을 배제한다는 것은 감쇠 손실에 의한 전자

기장의 공간적인 변화가 전파하는 전자기파의 파장보다 훨씬 긴 범위에서 일어나는 경우에 대해 유효한 근사임을 뜻한다. 즉, 감쇠손실의 효과가 무시될 수 있는 파장 정도의 짧은 범위에서는 위와 같은 근사는 정당성을 가진다고 하겠다.

본 논문에서는, 식 (1)과 (2)와 같은 가정하에 금속물질과 LHM과 같은 메타물질 간의 경계면에서 생성되는 SEP 및 SMP의 전파특성을 분산관계를 통하여 분석하였다. 물질상수(유전율과 투자율)가 다른 임의의 두 매질의 경계면에서 SEP와 SMP가 생성될 수 있는 일반화된 조건을 도출하였으며, 양쪽 매질을 통해 전파하는 에너지 비율의 차이에 의해 군속도와 위상속도가 반전될 수 있다는 물리적인 원인을 제안하였다. 일반화된 SP의 생성조건을 이용하여 금속물질과 메타물질의 경계면에서 전파하는 SEP와 SMP의 분산관계를 구하고, ω_p 와 ω_m 간의 상대적인 크기 관계와 주파수에 따라 다양한 전파 특성이 나타날 수 있음을 보였다. 특히, 양쪽 매질 중 어느 한 매질의 물질상수가 동시에 음수인 LHM이 아니더라도 SP의 위상속도와 군속도가 반전될 수 있음을 알았다.

II. 표면 플라리톤의 형성 조건

SP는 전기-편극 또는 자기-편극의 진동이므로 필연적으로 전자기파와 결합하여 존재하게 된다. 따라서, SP는 두 매질의 경계면을 따라 전파하는 표면 속박 전자기파와 분산 특성을 공유하게 되므로, 표면 속박 전자기파의 형성 조건과 SP의 형성 조건은 동일하다. 그림 1은 x-y 평면을 매질 1과 매질 2의 경계면으로 한 좌표계에서 x축을 따라 진행하는 표면 속박 전자기파로서, 다음과 같이 표현되는 파동함수를 갖는다.

$$\psi_a(\vec{x}) = \begin{cases} \psi_{a0} \hat{y} e^{i\beta x} e^{+\gamma_1 z} & (z < 0) \\ \psi_{a0} \hat{y} e^{i\beta x} e^{-\gamma_2 z} & (z > 0) \end{cases}, \quad (3)$$

a : SEP 또는 SMP, $\psi_{SEP} \equiv h$, $\psi_{SMP} \equiv e$

β , γ_1 , γ_2 는 각각, 전파상수(파 벡터의 전파 성분), 매질 1

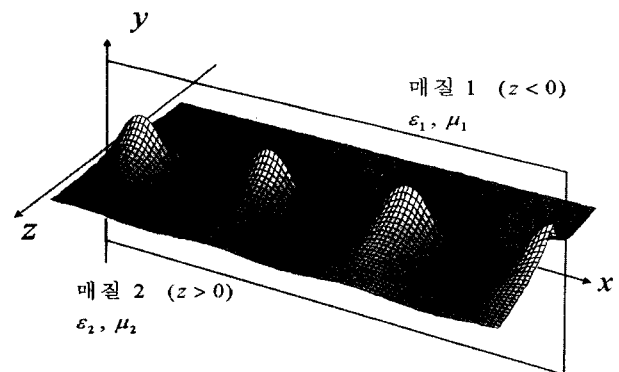


그림 1. 표면 플라리톤의 생성을 허용하는 매질의 조건을 도출하기 위해 선택한 계의 구성과 좌표 설정.

에서의 감쇠상수(파 벡터의 감쇠 성분), 매질 2에서의 감쇠 상수를 나타내고, e 와 h 는 전기장과 자기장을 표시한다. 식 (3)과 같이 주어진 파동함수가 각각의 매질 내에서와 경계면에서 맥스웰 방정식(Maxwell equations)을 만족하도록 요구함으로써, SEP와 SMP에 대한 전파상수와 감쇠상수가 가져야 할 관계들을 얻을 수 있다. SEP에 대해서는 다음과 같은 식 (4-1)~(4-4)의 관계를 만족한다.

$$\gamma_1 / \epsilon_1 = -\gamma_2 / \epsilon_2 \quad (4-1)$$

$$\beta^2 = f_{SEP} k_0^2, \quad f_{SEP} = \frac{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2 (\epsilon_1 / \epsilon_2)^2}{1 - (\epsilon_1 / \epsilon_2)^2} \quad (4-2)$$

$$\gamma_1^2 = (f_{SEP} - \epsilon_1 \mu_1) k_0^2 = \frac{\epsilon_2 \mu_2 - \epsilon_1 \mu_1}{1 - (\epsilon_2 / \epsilon_1)^2} k_0^2 \quad (4-3)$$

$$\gamma_2^2 = (f_{SEP} - \epsilon_2 \mu_2) k_0^2 = \frac{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2}{1 - (\epsilon_1 / \epsilon_2)^2} k_0^2 \quad (4-4)$$

SMP에 대해서는 아래의 식 (5-1)~(5-4)를 만족한다.

$$\gamma_1 / \mu_1 = -\gamma_2 / \mu_2 \quad (5-1)$$

$$\beta^2 = f_{SMP} k_0^2, \quad f_{SMP} = \frac{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2 (\mu_1 / \mu_2)^2}{1 - (\mu_1 / \mu_2)^2} \quad (5-2)$$

$$\gamma_1^2 = (f_{SMP} - \epsilon_1 \mu_1) k_0^2 = \frac{\epsilon_2 \mu_2 - \epsilon_1 \mu_1}{1 - (\mu_2 / \mu_1)^2} k_0^2 \quad (5-3)$$

$$\gamma_2^2 = (f_{SMP} - \epsilon_2 \mu_2) k_0^2 = \frac{\epsilon_1 \mu_1 - \epsilon_2 \mu_2}{1 - (\mu_1 / \mu_2)^2} k_0^2 \quad (5-4)$$

k_0 는 자유공간을 전파하는 평면파의 파수(ω/c)이다. 식 (3)으로 주어진 파동함수가 표면에 속박된 형태를 취하기 위해서는, 경계면에서 무한히 떨어진 위치($z \rightarrow \pm\infty$)에서의 전기장 및 자기장의 세기는 소멸되어야 하므로, γ_1 과 γ_2 가 모두 양의 실수가 되어야 한다는 것을 요구한다. γ_1 과 γ_2 가 모두 양의 실수이면서 동시에 식 (4-1) 또는 식 (5-1)을 만족하기 위해서는, SEP의 경우에는 ϵ_1 과 ϵ_2 가 서로 다른 부호($\epsilon_1 \epsilon_2 < 0$)를 가져야 하고, SMP의 경우에는 μ_1 과 μ_2 가 서로 다른 부호($\mu_1 \mu_2 < 0$)를 가져야 한다. 그리고, γ_1 과 γ_2 가 실수인 조건을 만족하기 위해서는, 식 (4-3)와 식 (4-4), 그리고 식 (5-3)와 식 (5-4)에서 오른쪽 항이 항상 0 보다 커야 되므로, $f_a - \epsilon_j \mu_j < 0$ (a : SEP 또는 SMP; j : 1 또는 2)인 조건을 두 매질 모두 만족해야 한다. 마지막으로, 식 (3)과 같이 주어진 표면 속박 전자기파가 표면을 따라 전파하는 파동이 되기 위

해서는 전파 상수 β 는 반드시 실수가 되어야 하므로, 식 (4-2)과 식 (5-2)로부터 SEP와 SMP에 대해서 각각 $f_{SEP} > 0$, $f_{SMP} > 0$ 인 조건이 만족되어야 한다. 이상의 논의에 따라 구성된 SEP와 SMP에 대한 일반화된 조건을 표 1에 정리하였다. 일반화된 조건이 가지는 의미를 구체적으로 알아보기 위해서는 $\epsilon - \mu$ 평면에 SEP와 SMP가 존재할 수 있는 영역을 표시하여 가시화 하는 것이 좋다. 그림 2에 매질 1의 (ϵ_1, μ_1)에 따라 SEP와 SMP의 전파를 허용하는 매질 2의 (ϵ_2, μ_2) 범위를 음영으로 표시하였다. 그림 2(a)의 $\epsilon_1 > 0$, $\mu_1 > 0$ 인 경우와 그림 2(d)의 $\epsilon_1 < 0$, $\mu_1 < 0$ 인 경우에는 표면 속박 조건이 면 방향으로의 전파 조건보다 SEP 및 SMP의 존재 영역을 결정하는데 주도적으로 작용하여 그림에서 파선으로 표시되어 있는 $\epsilon_1 \mu_1 = \epsilon_2 \mu_2$ 을 경계로 각각의 SP에 대한 존재 여부가 결정된다. 반면에, 그림 2(b)와 2(c)은 매질 1의 두 물질 상수 중 하나만 음수를 가지는 경우로서, 면 방향으로의 전파 조건이 주도적이어서 1점 쇄선으로 표시되어 있는 $\epsilon_1 / \mu_1 = \epsilon_2 / \mu_2$ 를 기준으로 SEP 또는 SMP의 존재 여부가 결정된다는 것을 알 수 있다. 그림 2에서 공통적으로 나타나는 사실은 하나의 고정된 물질상수에 대해서 SEP와 SMP가 동시에 생성될 수 있는 경우는 없으며, SEP와 SMP는 각각 조건이 반전되어 나타나는 2개의 영역을 가지고 있다는 것이다. 예를 들면 그림 2(a)에서 SEP가 가능한 영역(질은 회색 영역)을 보면, $\epsilon_2 = -\epsilon_1$ 을 기준으로 $\epsilon_2 > -\epsilon_1$ 인 경우에는 $\epsilon_2 \mu_2 < \epsilon_1 \mu_1$ 인 조건에서 그리고 $\epsilon_2 > -\epsilon_1$ 인 경우에는 $\epsilon_2 \mu_2 < \epsilon_1 \mu_1$ 인 조건에서 SEP의 존재가 가능하다. 반전된 각각의 영역은 전파특성이 다른 2 종류의 SEP 또는 SMP가 존재한다는 것을 시사한다. III장에서 구체적으로 다루겠지만, 조건이 반전된 두 영역은 각각 역방향의 군속도를 가지거나 또는 정방향의 군속도를 가지는 SP의 존재 가능 영역을 나타낸다.

III. 표면 플라리톤의 에너지 전달 효율

SP가 전달하는 에너지를 계산해 봄으로써, 그림 2에서 설명된 SEP 또는 SMP가 가능한 영역들이 갖는 물리적 의미를 파악할 수 있다. 물질상수가 알려져 있는 매질 내에서 전파되는 전자기파의 총 에너지(즉, Poynting 벡터의 크기)는 전자기파의 주파수와 공간적 분포에 의해 정해진다. 그리고, 식 (4)와 식 (5)로부터 구해지는 SP의 전파상수와 감쇠상수

표 1. 표면 플라리톤의 생성을 허용하는 두 매질의 물질상수들에 관한 조건

	Surface Electric Polariton	Surface Magnetic Polariton
표면 속박 조건 (감쇠 상수는 양의 실수)	$\epsilon_1 \epsilon_2 < 0$ $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_1 \mu_1 > \epsilon_2 \mu_2 \quad (-1 < \epsilon_1 / \epsilon_2 < 0) \\ \epsilon_1 \mu_1 < \epsilon_2 \mu_2 \quad (\epsilon_1 / \epsilon_2 < -1) \end{array} \right\}$	$\mu_1 \mu_2 < 0$ $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_1 \mu_1 > \epsilon_2 \mu_2 \quad (-1 < \mu_1 / \mu_2 < 0) \\ \epsilon_1 \mu_1 < \epsilon_2 \mu_2 \quad (\mu_1 / \mu_2 < -1) \end{array} \right\}$
면 방향으로의 전파 조건 (전파 상수는 실수)	$\left\{ \begin{array}{l} \mu_1 / \epsilon_1 > \mu_2 / \epsilon_2 \quad (-1 < \epsilon_1 / \epsilon_2 < 0) \\ \mu_1 / \epsilon_1 < \mu_2 / \epsilon_2 \quad (\epsilon_1 / \epsilon_2 < -1) \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_1 / \mu_1 > \epsilon_2 / \mu_2 \quad (-1 < \mu_1 / \mu_2 < 0) \\ \epsilon_1 / \mu_1 < \epsilon_2 / \mu_2 \quad (\mu_1 / \mu_2 < -1) \end{array} \right\}$

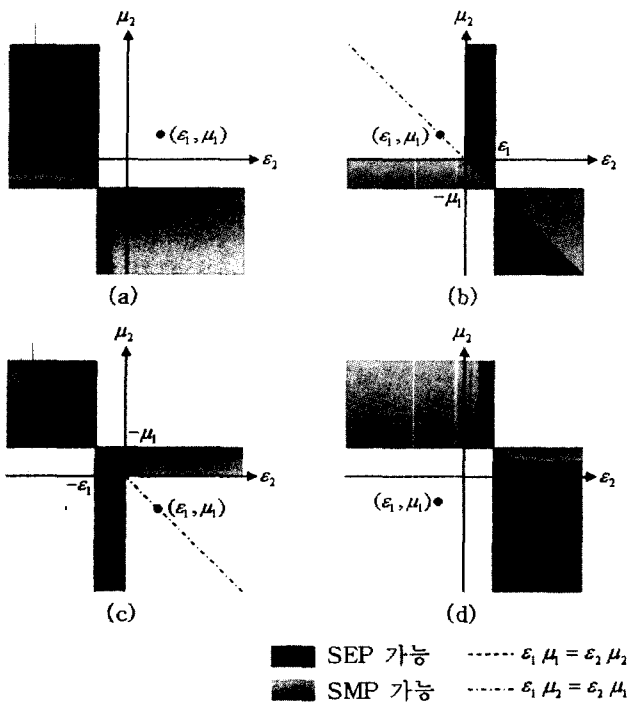


그림 2. 매질 1의 물질 상수 (ϵ_1, μ_1) 에 따른 표면 플라즈몬의 존재를 지원하는 매질 2의 물질 상수 (ϵ_2, μ_2) .
 (a) $\epsilon_1 > 0, \mu_1 > 0$, (b) $\epsilon_1 < 0, \mu_1 > 0$, (c) $\epsilon_1 > 0, \mu_1 < 0$,
 (d) $\epsilon_1 < 0, \mu_1 < 0$.

는 두 매질의 물질상수에 의해서 완전히 결정되므로, SP와 결합하는 전자기파의 공간적인 분포도 두 매질의 물질상수에 의해서 만이 정해지게 된다. 결과적으로, SP가 표면을 따라 전달하는 에너지는 두 매질의 물질상수들만의 함수로써 표현될 수 있다. 전파상수가 정의되어 있는 단일파장의 조화파(harmonic waves)가 단위시간, 단위면적을 통해 전달하는 에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{W} = \langle \vec{S} \rangle_t = \frac{1}{2} \frac{\text{Re}\{\vec{k}\}}{k_0} \frac{|\vec{e}|^2}{c\epsilon} \quad \left(\text{전기장 } \vec{E}(\vec{x}, t) = \text{Re}[\vec{e} \text{Exp}[i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)]] \right)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\text{Re}\{\vec{k}\}}{k_0} \frac{|\vec{h}|^2}{c\mu} \quad \left(\text{자기장 } \vec{H}(\vec{x}, t) = \text{Re}[\vec{h} \text{Exp}[i(\vec{k} \cdot \vec{x} - \omega t)]] \right).$$

(6)

$\vec{W}, \vec{S}, \langle \dots \rangle_t$ 는 각각, 단위시간 동안 단위 면적을 통해 유효하게 전달되는 에너지로 정의되는 유효 에너지 흐름 밀도 (effective energy flux density), 포인팅 벡터, 그리고, 시간평균을 나타낸다. 식 (3)으로 주어지는 SEP와 SMP 조화파에 대한 \vec{W} 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\vec{W}_{a1}(z) = \frac{1}{2} \frac{\beta}{k_0} \frac{\psi_{a0}^2}{c\epsilon_{a1}} \text{Exp}[+2\gamma_2 z] \hat{x} \quad (z < 0),$$

$$\vec{W}_{a2}(z) = \frac{1}{2} \frac{\beta}{k_0} \frac{\psi_{a0}^2}{c\epsilon_{a2}} \text{Exp}[-2\gamma_2 z] \hat{x} \quad (z > 0),$$

(7)

$$(\xi_{SEP_i}, \xi_{SMP_i}) = (\epsilon_i, \mu_i), \quad i = 1 \text{ 또는 } 2$$

여기서, 아래 첨자인 a는 SEP 또는 SMP를 의미한다. 두 매질이 각각 전달하는 에너지 흐름밀도, \vec{P}_{a1} 과 \vec{P}_{a2} , SP가 전달하는 총 에너지 흐름밀도, \vec{P}_a 는 \vec{W} 를 면의 수직 방향(z-축)에 대해서 적분함으로써 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\vec{P}_a = \vec{P}_{a1} + \vec{P}_{a2} \tag{8}$$

$$\vec{P}_{a1} = \int_{-\infty}^0 dz \vec{W}_{a1}(z) = \frac{\psi_{a0}^2}{4\omega} \frac{1}{\xi_{a1}} \sqrt{\frac{f_a}{f_a - \epsilon_1 \mu_1}} \hat{x} \tag{9}$$

$$\vec{P}_{a2} = \int_0^{+\infty} dz \vec{W}_{a2}(z) = \frac{\psi_{a0}^2}{4\omega} \frac{1}{\xi_{a2}} \sqrt{\frac{f_a}{f_a - \epsilon_2 \mu_2}} \hat{x} \tag{10}$$

위의 에너지 흐름밀도는 [Joule/sec · m] 차원을 갖는다. SP가 존재하기 위해서는 SEP와 SMP 모두 $\xi_{a1} \xi_{a2} < 0$ 인 조건을 만족해야 하므로, 식 (9)와 식 (10)으로부터 매질 1과 매질 2를 통해서 전달되는 에너지 흐름밀도인 \vec{P}_{a1} 과 \vec{P}_{a2} 는 언제나 서로 반대방향을 향한다는 사실을 알 수 있다. 그림 3에 ξ_{a1} 및 ξ_{a2} 의 부호에 따른 에너지 흐름밀도를 도시화하였다. 매질 1은 $\xi_{a1} > 0$ 이고 매질 2는 $\xi_{a2} < 0$ 이라 하면, 위상속도 (\vec{v}_{phase})는 파벡터의 실수 부분($\text{Re}\{\vec{k}\}$)과 같은 방향이므로 \vec{v}_{phase} 는 \vec{P}_{a1} 와 같은 방향이 되고 \vec{P}_{a2} 와는 반대방향을 갖는다. 총 에너지 흐름밀도 \vec{P}_a 는 양쪽 매질을 통해 각각 전파하는 에너지 흐름밀도의 합에 의해 결정되므로, 그림 3(a)와 같이 \vec{P}_a 의 방향인 군속도(\vec{v}_{group})가 \vec{v}_{phase} 와 같거나, 혹은 그림 3(b)와 같이 \vec{v}_{group} 와 \vec{v}_{phase} 가 서로 반전되는 경우가 발생한다. \vec{v}_{phase} 방향을 기준으로 양쪽 매질을 통해 전달되는 에너지 흐름밀도 크기의 합과 총 에너지 흐름밀도 크기의 비율을 유효 에너지 전달비율, η_a , 이라 정의하면, 다음과 같이 표현된다.

$$\eta_a = \frac{(\vec{P}_{a1} + \vec{P}_{a2}) \cdot \hat{k}}{|\vec{P}_{a1} \cdot \hat{k}| + |\vec{P}_{a2} \cdot \hat{k}|} = \frac{\xi_{a1} \sqrt{f_a - \epsilon_1 \mu_1} + \xi_{a2} \sqrt{f_a - \epsilon_2 \mu_2}}{|\xi_{a1}| \sqrt{f_a - \epsilon_1 \mu_1} + |\xi_{a2}| \sqrt{f_a - \epsilon_2 \mu_2}} \tag{11}$$

\hat{k} 는 $\text{Re}\{\vec{k}\} / |\text{Re}\{\vec{k}\}|$ 로 정의되는 단위 벡터이다. η_a 는 식 (11)의 맨 오른쪽에 있는 항에서 볼 수 있듯이 두 매질의 유전율과 투자율에만 의존하는 함수이므로, ϵ_1 과 μ_1 의 부호에 따라 $\epsilon_2 - \mu_2$ 평면에 η_a 의 값을 표기할 수 있다. 그림 4는 ϵ_1 과 μ_1 의 값을 +1, 또는 -1이라 가정할 때, ϵ_2 과 μ_2 의 값이 -5~+5 사이에서 변함에 따라 식 (11)에 의해 계산된 (a) η_{SEP} 와 (b) η_{SMP} 값을 음영으로 표시한 것이다. 그림의 우측 상단에 (ϵ_1, μ_1) 값을 표기하였으며, $\eta_a = 0$ 인 회색조의 배경을 기준으로 가장 밝은 부분은 $\eta_a = 1$ 을 나타내고 가장 어두운 부분은 $\eta_a = -1$ 이다. $\eta_a > 0$ 인 밝은 부분은 \vec{v}_{phase} 와 \vec{v}_{group} 가 서로 같은 방향인 표면 플라즈몬이 존재한다는 것을 의미하고, $\eta_a < 0$ 인 배경보다 어두운 부분에서는 반대 방향인 경우를 의미한다. 그림 2에서 살펴보았던 전파특성이 다른 2 종류의 SEP(또는, SMP)가 (ϵ_1, μ_1) 와 원점에 대해 대칭인

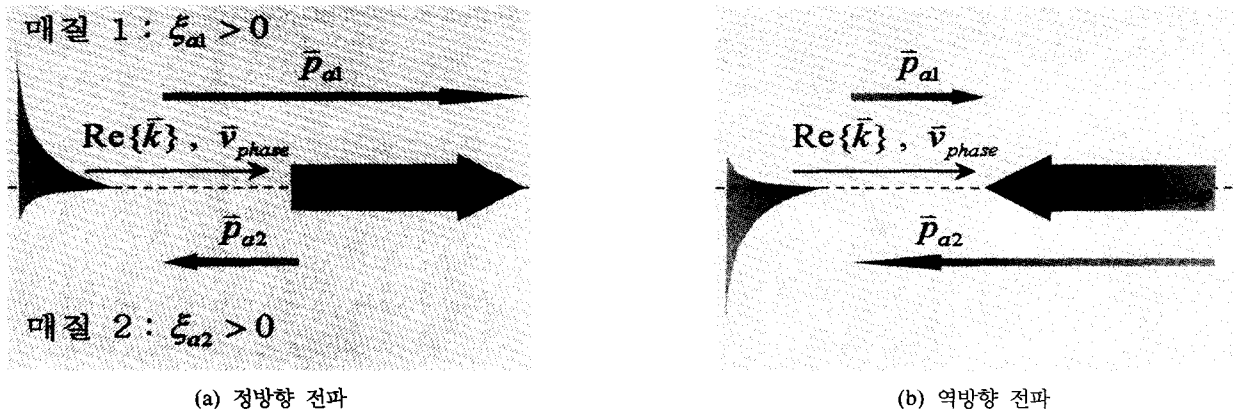


그림 3. 표면 플라리톤의 전파 방향. 군속도와 위상속도의 반전.

지점을 기준으로 교대로 나타났던 현상에 대한 물리적인 의미가 무엇인지 그림 4의 결과와 비교해 보면 명확하게 알 수 있다. 즉, 2 종류의 SEP(또는, SMP)란 \bar{v}_{phase} 와 \bar{v}_{group} 의 방향이 같은 방향이거나 반대 방향인 표면 플라리톤이다. 한 예로, 그림 2(a)에서의 SEP와 SMP 영역은 각각 그림4(a)의 $(\epsilon_1, \mu_1)=(1,1)$ 과 그림 4(b)의 $(\epsilon_1, \mu_1)=(1,1)$ 인 경우에 해당한다.

그림 4(a)와 (b)에 나타난 부분은 $\eta_a < 0$ 인 $(\epsilon_1, \mu_1)=(-1, -1)$ 인 경우 $\mu_2 < 0$ 이거나, $\epsilon_2 < 0$ 인 영역에서 가장 넓게 나타나며, $(\epsilon_1, \mu_1)=(1,1)$ 인 경우에는 ϵ_2 와 μ_2 가 모두 음인 영역에서 만이 매우 좁게 나타난다. 이와 같이 경계면을 형성하는 두 매질 중 한쪽 매질의 물질 상수가 모두 음수인 경우 즉, 음의 굴절률을 나타내는 매질 속에서 전자기파의 군속도와 위상속도가 반전되는 현상은 잘 알려진 LHM의 특성인데, 이를 정량화 하여 나타내기 위한 방법으로 식 (11)의 유효 에너지 전달비율이 효과적임을 알 수 있다. 그림 4(a)의 $(\epsilon_1, \mu_1)=(-1,1)$ 과 그림 4(b)의 $(\epsilon_1, \mu_1)=(-1,1)$ 인 경우에도 대부분의 $\eta_a < 0$ 는 ϵ_2 와 μ_2 가 모두 음인 영역에 나타나는데, $\mu_2 > 0$ 이거나 $\epsilon_2 > 0$ 인 영역에서도 일부 나타난다는 것은 매우 흥미로운 사실이다. 즉, 물질상수가 동시에 음이 아니라도 \bar{v}_{phase} 와 \bar{v}_{group} 가 서로 반전될 수 있는 경우가 발생한다는 사실로서, 그림 4(a)의 SEP 경우에서 $(\epsilon_1, \mu_1)=(-1,1)$ 이고 $\epsilon_2 > 0$ 인 영역에서와 그림 4(b)의 SMP 경우에서 $(\epsilon_1, \mu_1)=(-1,1)$ 이고 $\mu_2 > 0$ 인 영역에서 더욱 넓게 나타난다. 이러한 영역이 존재한다는 것은 다른 전자기파와는 구별되는 SP의 매우 고유한 특성으로서, 발생 원인을 다음과 같은 SP의 전파특성으로부터 찾을 수 있다. 그림 1에서 보면, SP는 두 매질의 경계면을 중심으로 양 쪽 매질에 동시에 결합되어 전파한다. 따라서, 접하고 있는 두 매질의 물질상수가 $\epsilon_1 < 0$ 와 $\mu_2 < 0$, 혹은, $\epsilon_2 < 0$ 와 $\mu_1 < 0$ 인 경우에도 SEP, 혹은, SMP의 \bar{v}_{phase} 와 \bar{v}_{group} 가 서로 반전될 수 있는 것이다.

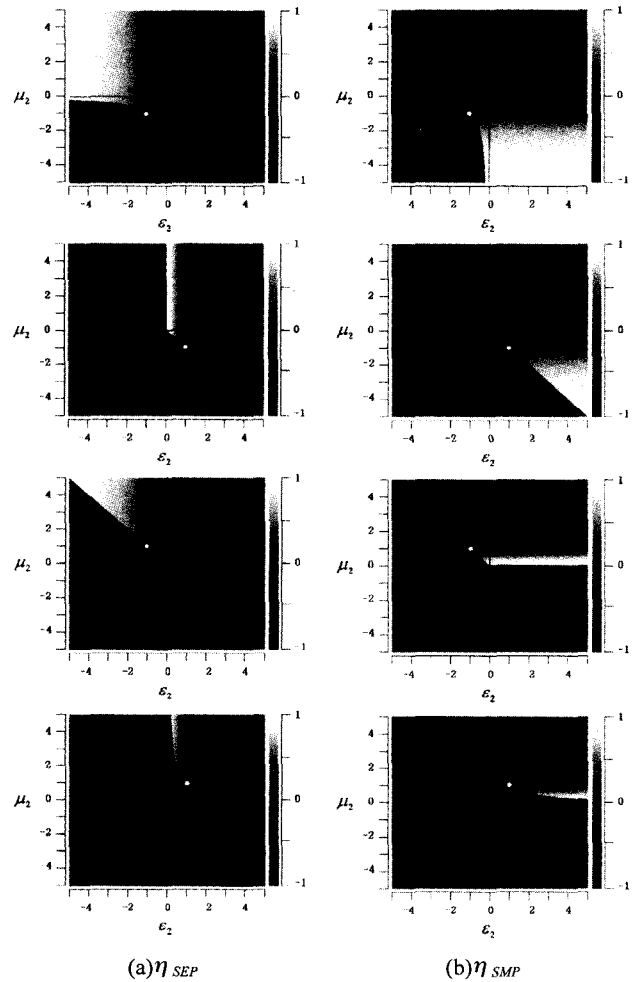


그림 4. 양쪽 매질의 물질 상수에 따른 유효 에너지 전파 비율.

IV. 금속과 메타물질의 경계면에서 생성되는 표면 플라리톤의 전파 특성

4.1. 금속물질과 메타물질의 분산특성

LHM과 같은 메타물질과 금속이 접해있는 경우에는, 두

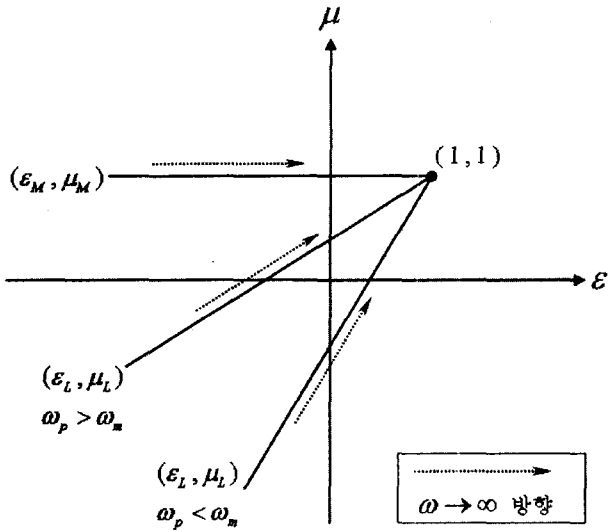


그림 5. 금속과 메타물질이 가지는 물질 상수들의 주파수 분산에 따른 $\epsilon - \mu$ 평면 상에서의 궤적.

매질의 물질상수가 갖는 분산특성에 의해 주파수가 변화함에 따라 그림 2의 4가지 경우가 모두 나타나게 된다. 금속의 물질상수(ϵ_M, μ_M)와 메타물질의 물질상수(ϵ_L, μ_L)가 갖는 주파수 분산관계는 식 (1)과 (2)에서와 같이 감쇠손실을 배제한다는 가정 하에 다음과 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_M(\omega) = 1 - \frac{\omega_M^2}{\omega^2}, \quad \mu_M(\omega) = 1 \quad (12)$$

$$\epsilon_L(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad \mu_L(\omega) = 1 - \frac{\omega_m^2}{\omega^2} \quad (13)$$

여기서, ω_M 은 금속에서의 플라즈마 주파수이다. 그림 5는 주파수가 증가함에 따라서 두 매질의 물질상수들이 $\epsilon - \mu$ 평면에서 직선 궤적을 가짐을 보여준다. 금속($\epsilon_M, \mu_M = 1$)은 $\mu = 1$ 인 직선을 따라 $\omega = 0$ 에서 $\epsilon_M \rightarrow -\infty$, $\omega = \omega_M$ 일 때 $\epsilon_M = 0$, $\omega \rightarrow \infty$ 일 때 $\epsilon_M = 1$ 의 값을 갖는다. 메타물질의(ϵ_L, μ_L)은 ω_p 와 ω_m 의 값의 상대적인 위치에 따라 다음과 같은 2 가지의 궤적을 갖는다. $\omega_p > \omega_m$ 인 경우, $\omega = 0 : (\epsilon_L \rightarrow -\infty, \mu_L \rightarrow -\infty)$; $\omega_m < \omega < \omega_p : (\epsilon_L < 0, \mu_L > 0)$; $\omega > \omega_p : (\epsilon_L < 0, \mu_L > 0)$ 와 같이 되며, $\omega_p < \omega_m$ 인 경우, $\omega = 0 : \epsilon_L \rightarrow -\infty, \mu_L \rightarrow -\infty$; $\omega_p < \omega < \omega_m : (\epsilon_L > 0, \mu_L < 0)$; $\omega > \omega_m : (\epsilon_L > 0, \mu_L > 0)$ 와 같은 궤적을 나타낸다. $\epsilon_L < 0, \mu_L < 0$ 인 주파수 범위 내에서의 메타물질은 LHM이 된다. 그림 2에서 매질 1이 메타물질이라 하면, $\omega_p > \omega_m$ 인 경우에는 주파수가 증가함에 따라 그림 2(d)→2(b)→2(a) 순서로 SP이 존재할 수 있는 영역이 변하고, $\omega_p < \omega_m$ 인 경우에는 그림 2(d)→2(c)→2(a) 순서로 변화하게 된다. 따라서, 금속의 ω_M 과, 메타물질의 ω_p 와 ω_m 관계에 의해 SP의 전파 특성(SEP와 SMP, 정방향 전파와 역방향 전파)은 매우 다르게 결정된다.

4.2. SEP의 분산관계와 전파특성

(12)와 식(13)으로 주어지는 두 매질의 주파수 분산을 가정 하면, 식 (4-2)로부터 다음과 같은 SEP의 분산관계식을 유도 할 수 있다.

$$B_{SEP}^2 = \left(\frac{1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2}{2(1 - \Omega_p^2)} \right) \frac{[\Omega^2 - 1][\Omega^2 - \Omega_p^2][\Omega^2 - \Omega_m^2 / (1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2)]}{\Omega^2[\Omega^2 - (1 + \Omega_p^2)/2]} \quad (14)$$

규격화된 전파상수(B_{SEP}) 및 규격화된 주파수($\Omega, \Omega_p, \Omega_m$)는 다음과 같이 정의된다. $B_{SEP} = \beta / (\omega_M / c)$, $\Omega = \omega / \omega_M$, $\Omega_p = \omega_p / \omega_M$, $\Omega_m = \omega_m / \omega_M$. $\Omega = 1, \Omega = \Omega_p, \Omega = \Omega_m / \sqrt{1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2}$ 에서 $B_{SEP} = 0$ 이 되고, $\Omega \rightarrow 0, \Omega \rightarrow \sqrt{(1 + \Omega_p^2)/2}$ 일 때 $B_{SEP}^2 \rightarrow \pm\infty$ 가 된다. $\text{Re}\{B_{SEP}\}$ 만이 SEP 전파에 기여를 하게 되므로, $B_{SEP}^2 < 0$ 인 경우는 SEP가 감쇠함을 의미한다. 일반적으로, 식 (14)의 분산관계는 규격화된 주파수들의 상대적인 값에 따라 결정되므로, B_{SEP} 값의 극한치에 따라 다음과 같은 5개의 분산-특성화-주파수(dispersion-characterization-frequency: DCF)들을 정의하여 사용하는 것이 편리하다.

$$DCF_0: Z_1 = 1, Z_p = \Omega_p, Z_{mp} = \Omega_m / \sqrt{1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2} \quad (15)$$

$$DCF_{\infty}: I_0 = 0, I_p = \sqrt{(1 + \Omega_p^2)/2} \quad (16)$$

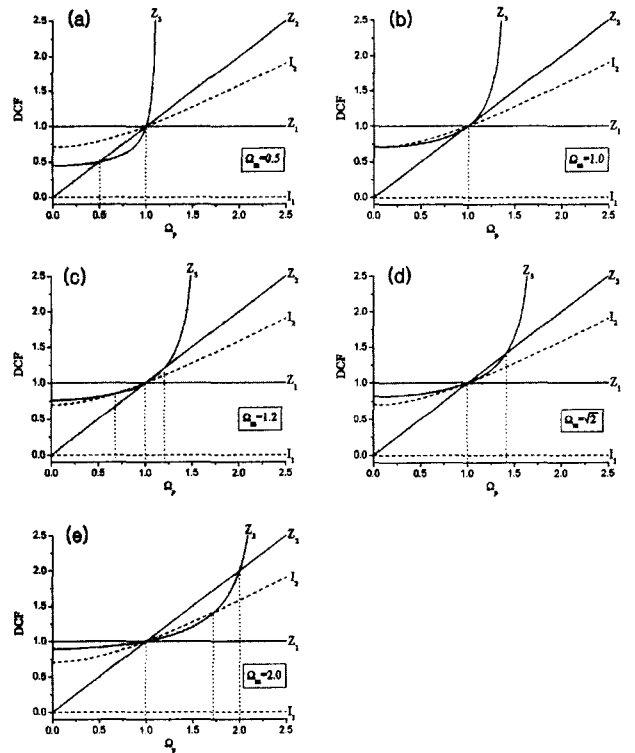


그림 6. Ω_p 에 따른 DCF의 변화.

(a) $\Omega_m < 1$, (b) $\Omega_m = 1.0$, (c) $1 < \Omega_m < \sqrt{2}$, (d) $\Omega_m = \sqrt{2}$, (e) $\Omega_m < \sqrt{2}$.

그림 6은 DCF들의 Ω_p 에 대한 의존성을 나타낸 계산결과로서, Ω_m 가 (a)0.5, (b)1.0, (c)1.2, (d) $\sqrt{2}$, (e)2.0 등으로 주어진 경우이다. 식 (4)와 식 (5)의 관계로부터 SEP는 양쪽 매질의 상대 유전율이 서로 다른 부호를 가져야 만이 생성될 수 있기 때문에, SEP가 존재할 수 있는 주파수 영역은 식 (12) 및 식 (13)에 의해 $1 \leq \Omega \leq \Omega_p$ 가 되어야 한다. 따라서, 그림 6의 모든 경우에 대해 $Z_1 \leq \Omega \leq Z_p$ 영역에서만 물리적인 의미를 갖는 SEP의 분산관계가 성립한다. DCF들의 상대적인 위치는 $\Omega_m = 1, \sqrt{2}$ 를 기점으로 해서 다르게 나타나는 것을 볼 수가 있다. 이것은 Z_{mp} 가 가지는 Z_p 와 I_p 의 교점의 위치가 두 Ω_m 의 값에서 중요한 변화를 나타내기 때문이다. Z_{mp} 와 Z_p 는 $\Omega_p = 1, \Omega_m$ 에서 교차하고, Z_{mp} 와 I_p 는 $\Omega_p=1, \sqrt{\Omega_m^2 - 1}$ 에서 교차한다. 따라서, $\Omega_m = 1$ 과 $\Omega_m=\sqrt{2}$ 를 기점으로 Ω_p 에 따른 DCF 값들의 상대적인 위치가 변하게 되어, SEP의 전파특성을 결정하는 중요한 기준이 된다.

그림 7은 Ω_p 가 0~2.5 사이의 값을 가질 때 Ω 에 대한 $\text{Re}\{B_{SEP}\}$ 의 분산관계를 식 (14)에 의해 계산한 밀도그림 (density plot)으로서, 0~5 사이의 $\text{Re}\{B_{SEP}\}$ 값이 명암으로 표시되어 있다. $\text{Re}\{B_{SEP}\}=0$ 을 나타내는 경계선들은 그림 6의 DCF들과 일치한다. 따라서, SEP의 전파특성은 식 (15)와 식 (16)의 DCF들 간의 관계에 의해 특정된다는 것을 명확히 알 수 있다. 그림 7의 SEP 밴드들에서 높은 주파수에 접근할

에 따라 작은 $\text{Re}\{B_{SEP}\}$ 값을 가지는 경우는 군속도와 위상속도가 반전되어 있다는 것을 의미하므로, SEP가 가질 수 있는 주파수 범위($1 \leq \Omega \leq \Omega_p$)에서는 $\Omega_m > 1$ 의 경우인 (c) $\Omega_m = 1.2$, (d) $\Omega_m = \sqrt{2}$, (e) $\Omega_m = 2$ 에서 군속도와 위상 속도의 방향이 반전되어 있는 SEP 밴드가 존재함을 알 수 있다. 자세히 살펴보면 $\Omega_m > 1, 0 < \Omega_p < \sqrt{\Omega_m^2 - 1}$ 의 조건을 만족할 경우, $0 < \Omega_p < 1$ 의 영역에서는 그림 7(c)-7(e)에서와 같이 $I_p < \Omega < Z_{mp}$ 밴드에서 속도 반전현상이 나타나며, $1 < \Omega_p < \sqrt{\Omega_m^2 - 1}$ 의 영역에서는 그림 7(e)의 $I_p < \Omega < Z_p$ 밴드에서 나타난다. 그 이외의 조건에서는 모두 정방향인 SEP 밴드를 갖는다.

역방향 SEP의 경우에 대해 매우 흥미로운 사실은, 그림 7(c)-7(e)에서와 같이 $0 < \Omega_p < 1$ 영역에서 $I_p < \Omega < Z_{mp}$ 밴드를 가지는 SEP가 역방향으로 전파하는 특성을 나타내지만 두 매질은 모두 LHM이 아닌 경우에 해당한다는 사실이다. 즉, ($\epsilon_M < 0, \mu_M = 1$)이고 ($\epsilon_L < 0, \mu_L < 0$)인 경우에 나타나는 위상속도와 군속도의 반전이다. 이러한 사실은 그림 4(a)의 (ϵ_1, μ_1)=(-1,1)인 경우에서 $\epsilon_2 > 0$ 와 $\mu_2 < 0$ 인 영역에서 속도반전 현상이 넓은 범위에 걸쳐 일어났던 것과 일치하는 결과이다.

$\Omega_m > \sqrt{2}$ 인 경우인 그림 7(e)의 분산관계 그림에서, $\Omega_p = 0.5$ (직선 A), $\Omega_p = 1$ (직선 B), $\Omega_p = 2.25$ (직선 C)에 대한 SEP 분산곡선(B_{SEP})이 각각 그림 8(a), 8(b), 8(c)에 실선으로

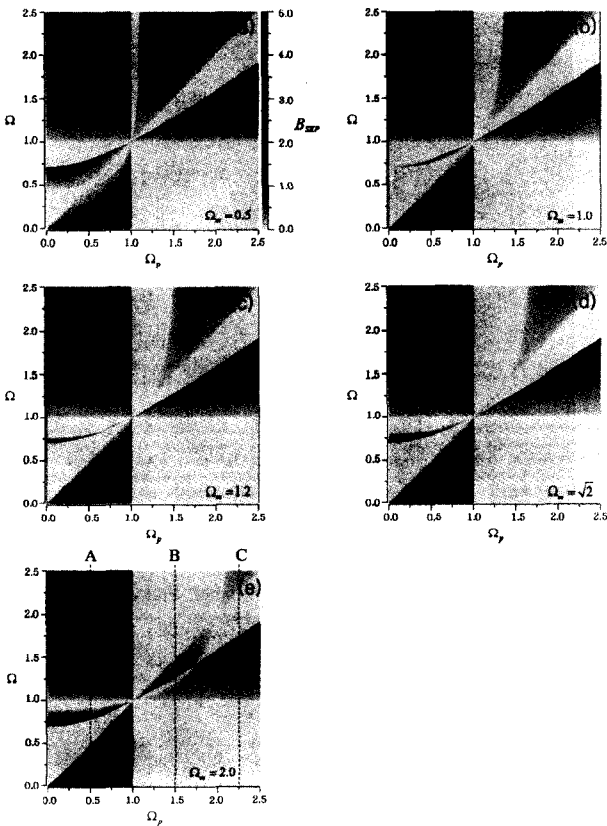


그림 7. SEP의 분산 특성. (a) $\Omega_m < 1$, (b) $\Omega_m = 1.0$, (c) $1 < \Omega_m < \sqrt{2}$, (d) $\Omega_m = \sqrt{2}$, (e) $\Omega_m > \sqrt{2}$.

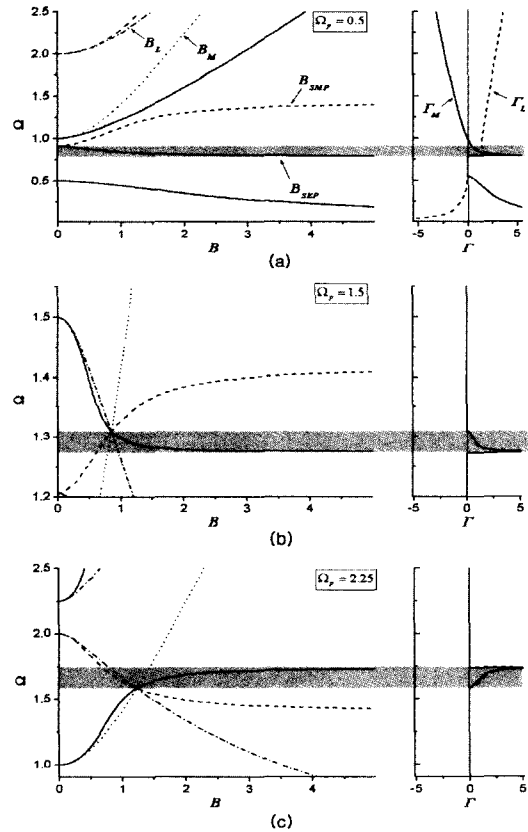


그림 8. SEP 분산 곡선과 감쇠상수의 주파수 의존. 그림 7. (e)의 직선 (a) A, (b) B, (c) C.

도시되어 있다. 그림 8에서 보면, B_{SEP} 의 특성을 보다 상세히 알아보기 위해 다음과 같은 5가지의 분산곡선이 동시에 도시되어 있다. B_M 과 B_L 는 (ω_M/c) 으로 규격화 된 전파상수로서, 각각 금속 매질에서와 LHM 매질에서의 값을 나타낸다. 그리고 Γ_M 과 Γ_L 는 ω_M 으로 규격화 된 금속영역 쪽으로의 SEP 감쇠상수와 메타물질에서의 SEP 감쇠상수이고, B_{SMP} 는 앞으로 설명될 예정인 식 (17)으로부터 구한 SMP의 분산곡선이다. 그림 8에서 회색으로 표시되어있는 영역은 Γ_M 과 Γ_L 이 양의 실수 값을 가져야 한다는 식 (3)의 SEP 속박조건과 B_{SEP} 가 실수의 값을 가져야 한다는 표면 전파 조건이 동시에 만족되는 주파수 대역으로서, 반 무한 평면에서 나타날 수 있는 SEP의 주파수 밴드를 표시한다. 그림 8(a)에서 회색으로 표시된 밴드는 금속매질이 음의 상대 유전율과 양의 상대 투자율을 가지며 메타물질이 양의 상대 유전율과 음의 상대 투자율을 가지는 경우에 나타나는 역방향 SEP 분산 곡선을 보여준다. $\Omega < 0.05$ 와 $\Omega > 1$ 에서 나타나는 두 개의 SEP 곡선은 비록 B_{SEP} 가 양의 실수 값을 갖는 경우이나 Γ_M 과 Γ_L 이 0보다 작은 값을 나타내기 때문에 표면 속박 조건에 위배되어 반 무한 평면 구조에 대해서는 가능한 SEP가 아니다. 그러나, 금속매질이나 메타물질이 얇은 구조에서는 장거리 SEP를 형성하는데 기여를 가지는 밴드가 될 것이다.^[22] 그림 8(b)의 $\Omega_p = 1$ 인 경우를 보면, $1.31 < \Omega < 1.50$ 영역에서 감쇠상수의 실수부분은 0이다. 즉, 감쇠상수가 허수의 값을 가진다는 의미로서 면에 수직인 방향으로 감쇄하는 형태가 아닌, 진동하는 전자기장 분포를 나타낸다는 사실을 내포한다. 따라서 이는 면 수직 방향으로 전파하는 모드 즉, 새는(leaky) SEP 모드의 주파수 대역을 나타낸다. 그리고, $1.27 < \Omega < 1.31$ 주파수 밴드에서 역방향 분산관계를 갖는데, $\epsilon_L < 0$, $\mu_L < 0$, 그리고, 금속의 상대 유전율은 양수의 값을 가지는 경우로서 한 쪽 매질이 LHM 특성을 가질때 형성되는 역방향 SEP이다. 그림 8(c)의 경우는 8(b)와 마찬가지로 $\epsilon_L < 0$, $\mu_L < 0$ 인 매질 특성이 나타나는 주파수 영역에서 SEP가 존재하지만, SEP 분산관계는 정방향 전파특성을 나타내고 있다. 그림 8에서 공통으로 보여지는 사실은 파선으로 표시되어 있는 SMP의 분산곡선과 실선으로 표시되어 있는 SEP 분산곡선 중에서, SEP와 SMP의 전파를 동시에 허용하는 주파수 밴드가 없다는 것이다. 이는 SP의 존재를 지원하는 양쪽 매질의 일반적인 조건인 그림 2 또는 표 1에서 논의된 바와 일치한다.

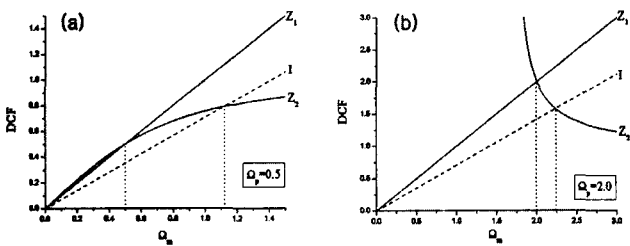


그림 9. Ω_m 에 따른 DCF의 변화. (a) $\Omega_p < 1$ 인 경우, (b) $\Omega_p > 1$ 인 경우.

4.3. SMP의 분산관계와 전파특성

식 (14)의 B_{SEP} 와 유사한 과정을 통하여 다음과 같이 SMP의 분산관계식 및 DCF를 얻을 수 있다.

$$B_{SMP}^2 = \left(\frac{1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2}{2\Omega_m^2} \right) \frac{[\Omega^2 - \Omega_m^2][\Omega^2 - \Omega_m^2 / (1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2)]}{[\Omega^2 - \Omega_m^2 / 2]} \tag{17}$$

$$DCF_0 : Z_m = \Omega_m, \quad Z_{mp} = \Omega_m / \sqrt{1 + \Omega_m^2 - \Omega_p^2} \tag{18}$$

$$DCF_{\infty} : I_m = \Omega_m / \sqrt{2} \tag{19}$$

그림 9는 (a) $\Omega_p = 0.5$ 와 (b) $\Omega_p = 2$ 인 경우에 Ω_m 에 대한 SMP의 DCF들의 변화를 나타낸다. SMP의 분산 밴드는 반드시 Z_m 곡선의 아래쪽에 위치해야 하는데, 이는 SMP가 형성되기 위해서 양쪽의 매질이 서로 다른 부호의 상대 투자율을 가져야 한다는 조건 때문이다. 금속영역의 상대 투자율이 주파수와 무관하게 0보다 큰 값인 1로 고정되어 있기 때문에, 메타물질 영역의 상대 투자율이 0보다 작은 주파수 대역인 $\Omega < \Omega_m$ 에서 SMP의 존재가 가능하다. SMP의 DCF들은 $\Omega_p = 1$ 을 기점으로 Ω_m 에 대한 의존이 구조적인 변화를 가지게 된다. 그 이유는 Z_{mp} 는 $\Omega_p > 1$ 인 경우에 $\Omega_m < \sqrt{\Omega_p^2 - 1}$ 의 조건에서 허수의 값을 가지는 반면, $\Omega_p < 1$ 인 조건에서는 모든 Ω_m 에 대해 실수의 값을 가지기 때문이다. Z_m 과 I_m 는 교차점을 가지지 않으며, 모든 Ω_m 에 대해서 항상 $Z_m > I_m$ 인 관계를 유지한다. Z_m 과 Z_{mp} 는 $(\Omega_m, \Omega) = (\Omega_p, \Omega_p)$ 에서, Z_{mp} 와 I_m 는 $(\Omega_m, \Omega) = (\sqrt{\Omega_p^2 + 1}, \sqrt{(\Omega_p^2 + 1)}/2)$ 에서 교차된 후 상대적인 위치가 바뀌게 된다.

그림 10은 식 (17)로부터 계산된 $Re\{B_{SMP}\}$ 의 밀도그림으로서, 그림 9의 DCF들과 일치하는 명암의 경계선을 가지고 있다. 그림 10(a)의 $\Omega_p = 0.5$ 인 경우와 10(b)의 $\Omega_p = 2$ 인 경우에서 알 수 있는 사실은, Ω_p 의 크기에 관계없이 $\Omega_m < \sqrt{\Omega_p^2 + 1}$ 인 조건에서는 항상 역방향 SMP가 나타나며, $\Omega_m > \sqrt{\Omega_p^2 + 1}$ 조건에서는 정방향 SMP의 분산 밴드가 나타난다는 것이다. 특히, SMP에서도 SEP와 마찬가지로 상대 유전율과 상대 투자율이 동시에 음수의 값을 갖지 않더라도 군속도와 위상속도가 반전되는 현상이 나타나는데, 그림 10(a)와 같은 $\Omega_p < 1$ 인 경우에 $\Omega_p < \Omega_m < \sqrt{\Omega_p^2 + 1}$ 인 조건에서 금속의 상대 유전율과 메타물질의 투자율만이 음의 값을 갖는 역방향 SMP의 분산 밴드가 존재하게 된다. 그림 11은 그림 10(b)에

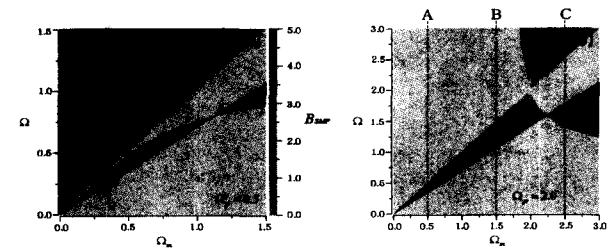


그림 10. SMP의 분산 특성. (a) $\Omega_p < 1$ 인 경우, (b) $\Omega_p > 1$ 인 경우.

서 $\Omega_p=0.5$ (직선 A), $\Omega_p=1.5$ (직선 B), $\Omega_p=2.5$ (직선 C)인 경우에 대한 SMP의 분산관계를 실선으로 나타낸 것이다. B_{SMP} 이외의 분산곡선들은 SEP의 경우인 그림 8에서와 동일하게 정의된 분산상수들이다. 그림 11(a)는 $\Omega_p < 1$, $\Omega_m < 1$ 인 경우로서, 그림 11(b)와 11(c)와는 달리 새는(leaky) SMP 모드가 발생하지 않으며, 회색으로 표시된 주파수 대역에서 역방향 전파특성을 갖는 SMP 밴드가 나타난다. 그림 11(b)는 $\Omega_p > 1$, $1 < \Omega_m < \sqrt{\Omega_p^2 + 1}$ 인 조건에서 나타나는 SMP 분산 밴드로서, $1.3 < \Omega < 1.5$ 에서 새는 SMP 모드가 존재하고 그 이하의 주파수에서 역방향 SMP 전파특성을 갖는다. 마지막으로, 그림 11(c)에서는 $\Omega_p > 1$, $\Omega_m > \sqrt{\Omega_p^2 + 1}$ 일 때의 SMP 분산 밴드로서, 항상 정방향 SMP 전파특성을 가지며 낮은 파수 영역에서 양쪽 매질로 새는 SMP 모드가 존재한다.

IV. 결 론

두 매질의 경계면에서 SP(SEP와 SMP) 전파를 허용하는 물질상수(유전율과 투자율)들 간의 일반화된 조건과 유효 에너지 전달비율에 관한 계산결과를 통해, SP가 갖는 전파특성을 다음과 같이 두 가지로 요약할 수 있다: (i)임의의 한 주파수에서 SEP와 SMP가 동시에 전파되는 경우는 없으며, 주

파수에 대한 두 매질의 물질상수가 정해지면 SP는 SEP, 또는, SMP 형태로 만이 전파된다; (ii)SP의 군속도와 위상속도 간의 진행방향 반전현상은 한 매질의 물질상수가 동시에 음수인 LHM 경우 이외에도, 한 쪽 매질은 유전율 만이 음수이고 다른 한 쪽 매질은 투자율 만이 음수인 경우에도 나타난다.

금속물질과 LHM과 같은 메타-물질의 경계면에 대한 SEP와 SMP의 분산관계를 통하여, 위에서 언급된 SP의 전파특성 및 일반화된 전파조건을 정량화하여 나타낼 수 있음을 확인하였다. 금속의 상대 유전율과 메타물질의 상대 유전율 및 투자율이 전기-플라즈마 및 자기-플라즈마 응답으로 주어지는 주파수 분산을 가지도록 가정했을 때, 이러한 3개의 물질상수가 갖는 주파수 분산을 결정하는 3개의 주파수들(금속의 플라즈마 주파수, 메타물질의 플라즈마 주파수 및 자기-플라즈마 주파수 조합으로 주어지는 분산-특성화-주파수(DCF)를 SEP와 SMP에 대해 각각 정의할 수 있었으며, DCF들의 상대적인 크기에 의해 SEP와 SMP의 분산관계로 규정되는 SP 전파특성이 결정된다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00324-0(2002))지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] C. Kittel, *Introduction to solid state physics*, 7th ed. (John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1996), pp. 269- 304.
- [2] K. Sasaki and T. Nagamura, "Ultrafast all-optical switch using complex refractive index changes of thin films containing photochromic dye", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, pp. 434-436, 1997.
- [3] T. Okamoto, T. Kamiyama, and I. Yamaguchi, "All- optical spatial modulator with surface plasmons resonance", *Opt. Lett.*, vol. 18, pp. 1570-1572, 1993.
- [4] H. J. Simon, D. E. Mitchell, and J. G. Watson, "Optical second-harmonic generation with surface plasmons in silver films", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 33, pp. 1531-1534, 1974.
- [5] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, "Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays", *Nature*, vol. 391, no. 12, pp. 667-669, 1998.
- [6] E. Altewischer, M. P. van Exter, and J. P. Woerdman, "Plasmon-assisted transmission of entangled photons", *Nature*, vol. 418, no. 18, pp. 304-306, 2002.
- [7] H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, and T. W. Ebbesen, "Beaming light from a subwavelength aperture", *Science*, vol. 297, pp. 820-822, 2002.
- [8] H. Raether, *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*(Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1988),

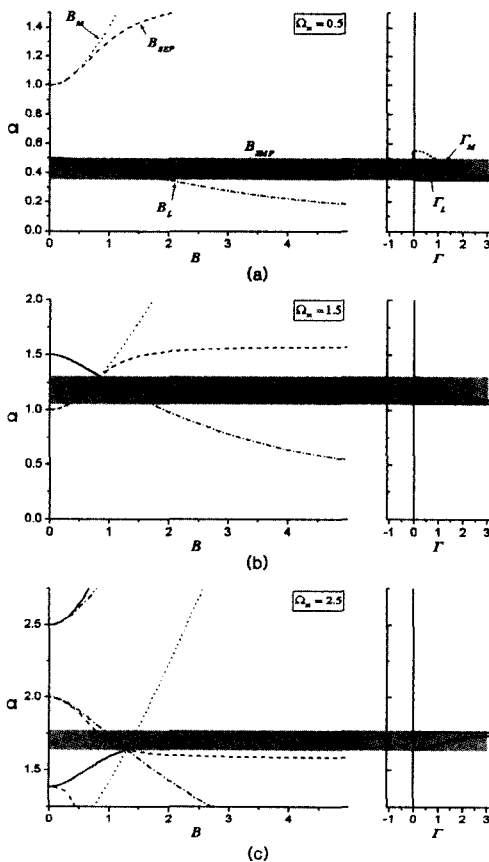


그림 11. SMP 분산 곡선과 감쇠상수의 주파수 의존. 그림 10. (b)의 직선 (a) A, (b)B, (c)C.

- pp. 4-37.
- [9] L. Martin-Moreno, F. J. Garcia-Vidal, H. J. Lezec, A. Degiron, and T. W. Ebbesen, "Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 90, no. 16, 167401, 2003.
- [10] J. M. Vigoureux, "Analysis of the Ebbesen experiment in the light of evanescent short range diffraction", *Optics Communications*, vol. 198, pp. 257-263, 2001.
- [11] F. J. Garcia-Vidal and L. Martin-Moreno, "Transmission and focusing of light in one-dimensional periodically nanostructured metals", *Phys. Rev. B*, vol. 66, 155412, 2002.
- [12] E. Popov, M. Neviere, S. Enoch, and R. Reinisch, "Theory of light transmission through subwavelength periodic hole arrays", *Phys. Rev. B*, vol. 62, no. 23, pp. 16100-16108, 2000.
- [13] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics 3rd ed.* (John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1999), pp. 309- 335.
- [14] D. R. Smith, D. C. Vier, N. Kroll, and S. Schultz, "Direct calculation of permeability and permittivity for a left-handed metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 14, pp. 2246-2248, 2000.
- [15] 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, no. 18, pp. 4184-4187, 2000.
- [16] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic me-
sostructures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, 1996.
- [17] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, 1999.
- [18] A. D. Boardman, *Electromagnetic surface modes* (John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1982), pp. 633- 660.
- [19] R. Ruppin, "Surface polaritons of a left-handed medium", *Phys. Lett. A*, vol. 277, pp. 61-64, 2000.
- [20] R. Ruppin, "Surface polaritons of a left-handed material slab", *J. Phys. : Condens. Matter*, vol. 13, pp. 1811-1818, 2001.
- [21] Yu. I. Bespyatykh, A. S. Bugaev, and I. E. Dikshtein, "Surface polaritons in composite media with time dispersion of permittivity and permeability", *Physics of the Solid State*, vol. 43, no. 11, pp. 2130-2135, 2001.
- [22] D. Sarid, "Long-range surface-plasma waves on very thin metal films", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 47, no. 28, pp. 1927-1930, 1981.

Propagation of surface polaritons at the interface of metal and left-handed metamaterial

Jaewoong Yoon, Seok Ho Song[†], Cha-Hwan Oh, and Pill-Soo Kim

Microoptics National Research Laboratory, Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

[†]*E-mail: shsong@hanyang.ac.kr*

(Received November 6, 2003, Revised manuscript January 30, 2004)

At the interface of two materials with frequency-dependent material-parameters of permittivity and permeability, there may exist two kinds of surface polaritons: surface electric-polaritons(SEPs) and surface magnetic-polaritons(SMPs). Possible combinations of the material-parameters to support propagation of the two surface polaritons are suggested at the interface between metals and metamaterials such as a left-handed material. Dispersion relations are also derived in order to characterize frequency dependence of propagation of the SEP and SMP. It is found that only one propagation mode of SEP or SMP is allowed at a given set of four material parameters, and that counter-propagation of the phase and group velocities of the propagation mode can be observed even in the case when there are no double negative(or, negative-index) materials. Physical origin of the counter-propagation of the group velocity is proposed by evaluating the ratio of two electromagnetic-energy densities of a surface polariton propagating along within the two interface media, and it is confirmed by the dispersion relations.

OCIS Codes : 000.1600, 240.5420, 240.6690.