

초고감도 고선택성 테라헤르츠 분자 센서 응용

서민아

한국과학기술연구원

I. 배경 및 필요성

테라헤르츠파는 일반적으로 주파수 상으로 0.1~10 THz (테라헤르츠, 1조 헤르츠(Hz), 1초에 10¹²번 진동하는 전자파) 대역의 전자파로, 파장으로는 0.03~3밀리미터에 이르며, 가시광이나 적외선보다 파장은 길고 에너지는 낮아 비이온화 특성을 지닌다. 비이온화 특성 때문에 대부분의 물질에 큰 손상 없이 내부를 투시할 수 있어, 비접촉 방식으로 의료 영상, 보안, 통신 등 그 활용 가능성이 매우 크다. 특히 펄스 형태의 테라헤르츠파는 넓은 스펙트럼 영역에 존재하는 분자 고유의 진동 주파수를 구별하는 분광에 가장 널리 이용되어 왔다. 테라헤르츠 대역에는 다양한 유기물이나 생화학 분자들이 공명하는 주파수가 존재하며, 이를 미세량까지 센싱하는 산업적 요구가 꾸준히 있어왔다. 그러나 기존의 전형적인 테라헤르츠파 분광법으로는 검출 대상의 농도가 매우 높을 경우에만 측정이 가능하게 되어, 그 민감도를 높이는 연구가 매우 절실한 상황이다.

이를 위해 최근 들어 광학 상수 값 등 자연계에 존재하지 않는 물질 값을 구현하고자 시작된 메타물질(metamaterial)의 개념을 테라헤르츠파 영역에 적용시켜볼 수 있다. 메타물질에 관한 연구는 빛의 전 파장 영역에 걸쳐 활발하게 수행되고 있으며, 이는 기존의 테라헤르츠 분광법의 성능을 향상시켜 관련 연구에 더욱 박차를 가할 것으로 기대를 모으고 있다. 본 원고에서는 테라헤르츠 분광법 고유의 분자인식 특성을 잘 살리면서도 메타물질을 이용하여 민감도를 극대화시켜, 고민감도 고선택성 테라헤르츠 분광법을 구현하는 방법과 이 기술의 응용에 대하여 자세하게 소개하고자 한다.

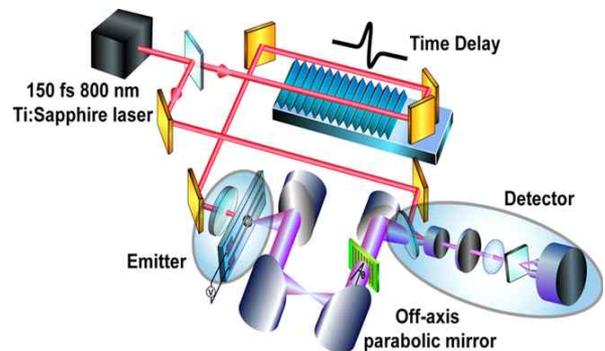
II. 테라헤르츠 흡수 스펙트럼 분석

테라헤르츠파 시간 기반 분광법(Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)을 이용한 응용 사례의 대표적인 예

로 흡수 스펙트럼 분석을 통한 분자의 구별 즉 분광법을 들 수 있다(그림 1). 먼저 테라헤르츠 시간 기반 분광법의 기본이 되는 펄스형 테라헤르츠파의 발생을 위해 펄스형 펌토초 레이저(femtosecond laser)를 이용한다. 펌토초 레이저에서 발생한 극초단 레이저 펄스 빔은 빔-분배기(beam splitter)를 통해 펌프와 프로브로 나누어지며, 이 중 펌프에 해당되는 빔이 전압이 인가된 안테나 형태의 GaAs 결정 기반 에미터(emitter)에 집중되면서 테라헤르츠파를 발생시킨다. 발생된 테라헤르츠파는 가이드 미러(parabolic mirror) 등을 거친 후에 검출 결정(ZnTe)에서 갈라진 프로브 빔과 다시 만나게 되는데, 이때 두 펄스 빔이 만나는 시간차를 이용하여 펄스형 테라헤르츠파의 시간 기반 파형을 간접적으로 얻을 수 있게 된다. 이때 테라헤르츠 빔이 지나가는 경로에 측정하고자 하는 샘플 시료를 위치시켜, 투과 또는 반사 값의 변화를 통해 샘플의 테라헤르츠 영역에서의 광학 특성을 얻게 된다.

시간 기반 펄스형 테라헤르츠 파형은 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 주파수 기반 데이터로 변환할 수 있으며, 다음과 같은 관계식에 의해 물질 고유의 주파수 기반 흡수 스펙트럼을 얻을 수 있다.

먼저 샘플에 입사되는 테라헤르츠파 전기장 크기($E_{ref}(\omega)$)와 투과되는 빔의 전기장 크기($E_{sam}(\omega)$)를 측정함



[그림 1] 테라헤르츠 시간 기반 분광 장치

으로써, 투과도 T 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = I_{sam}(\omega) / I_{ref}(\omega) = (E_{sam}(\omega))^2 / (E_{ref}(\omega))^2$$

또한 물질의 흡수도 $\alpha(\omega)$ 와 굴절률 $n(\omega)$ (복소 굴절률의 실수부)은 다음과 같은 관계식을 만족한다. 이때 d 는 샘플의 두께이다.

$$E_{sam}(\omega) = E_{ref}(\omega) \exp\left(-\frac{d\alpha(\omega)}{2}\right) \exp\left(i\frac{2\pi}{\lambda}n(\omega)d\right)$$

위의 수식으로부터, 물질의 테라헤르츠파 흡수도를 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때 λ 는 파장이며, k 는 복소 굴절률의 허수 부분이다.

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln(T) = -\frac{2}{d} \ln\left(\left|\frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)}\right|\right) = \frac{4\pi\kappa}{\lambda}$$

이 흡수도는 물질에 따라 다르며, 물질을 이루는 분자 구조에 따라, 특정 주파수에서 강한 진동 모드를 가지는 경우, 흡수 피크(peak)를 보이게 된다. 이 흡수 피크는 분자의 구조에 따라 다르기 때문에, 물질을 식별하는데 중요한 지표가 되어 테라헤르츠 분광법에 기반한 센싱과 검출 응용을 가능하게 한다.

III. 테라헤르츠 메타물질

시간 기반 테라헤르츠 분광법을 이용하여 물질의 흡수 스펙트럼을 얻을 때, 물질의 농도가 높을수록 뚜렷한 흡수 스펙트럼을 얻을 수 있게 된다. 따라서 대부분의 경우, 시료의 농도를 높이기 위해 분말 형태의 시료를 준비한 후, 이를 고압 또는 고온에서 압착한 알약 형태로 제작하여 측정한다. 특히 테라헤르츠가 물 분자 자체를 많이 흡수하는 특성 때문에 저농도 수준에서 물 등의 액체에 녹아있는 분자의 식별은 더욱 어렵다.

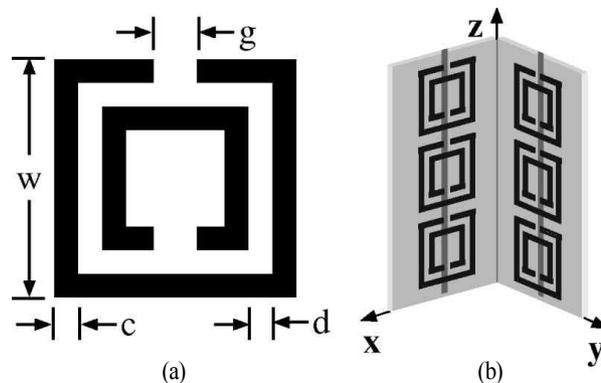
이를 해결하기 위하여 메타물질을 이용할 수 있는데, 메타물질 등으로 테라헤르츠파의 특정 분자에 대한 흡수 단면적(absorption cross section)을 늘리는 것이 그 원리이다. 본

장에서는 테라헤르츠 주파수 대역의 메타물질의 기본적인 특성과 이를 고민감도 분자 센서로 이용하기 위한 구체적인 방법을 소개하고자 한다.

3-1 분리된 링 공진기 메타물질(Split Ring Resonator, 분리된 링 구조, C 또는 링 모양)

메타물질이란 금속이나 유전 물질 등을 특정한 구조로 인위적으로 만든 ‘단위 원자’를 주기적으로 배열한 것으로, 자연계에 존재하지 않는 광학적 성질(유전 상수 등)을 갖기도 한다. 분리된 링 공진기 구조는 1999년 J. Pendry가 음의 투자율이 구현 가능한 물질의 예로써 처음 소개한 이후, 현재까지도 가장 널리 활용되고 있는 대표적인 메타물질 중의 하나이다(그림 2)^[1]. 단순하게 분리된 링 구조에서부터 링 구조가 서로 교차하는 방향, 배열 방법, 분리된 갭의 폭, 반복되는 패턴 등 다양하게 그 모양이 변형되어 사용되고 있다. Pendry는 SRR 단위 원자가 주기적으로 배열된 구조에서 특정 공진 주파수에서 음의 투자율을 가질 수 있음을 보였는데, 나중에 Smith와 Shelby 등이 마이크로파(GHz) 대역에서 음의 투자율로만 설명 가능한 실험 결과를 제시하면서 이를 현실화 시켰다^{[2][3]}.

처음의 유전율은 전기장에 평행한 금속 막대기를 통해 비교적 쉽게 구현할 수 있지만, 음의 투자율을 얻기 위한 구조는 고리 면이 자기장과 수직이어야 하므로 제작 자체가 매우 힘들다. 따라서 상대적으로 구조물의 크기가 커서 공진 면에서 좀 더 수월한 마이크로파(GHz) 영역이나 테라헤르츠(THz) 영역에서 메타물질을 이용한 음의 투자율에 대



[그림 2] 초기 메타물질에 사용된 SRR 구조^[4]

한 연구가 일찍 시작되었다. [그림 3]은 테라헤르츠 대역에서 근적외선 대역까지 SRR 인공 단위 원자의 크기 및 모양의 변화를 나타낸 것이며, 시간상으로 볼 때 낮은 주파수(긴 파장)에서 높은 주파수(짧은 파장) 영역대로 갈수록 다양한 공정법의 개발로 인해 구조물의 크기가 점차 작아진다.

처음으로 테라헤르츠 대역에서 작동하는 SRR 구조는 약 1 THz(파장 300 마이크로미터)에서 동작하도록 제작되었으며, 이후 좀 더 높은 주파수(짧은 파장)에서 작동하는 메타물질을 만들기 위해 구조물의 크기는 더 작아져야 했다. 2004년 100 THz(파장 3 마이크로미터)에서 작동하는 단순한 단일 SRR이 소개되었다^[5]. 이때 링 구조는 일반적인 LC 회로(유도용량 L , 정전용량 C)로 간주되어 해석이 되며([그림 4]), 단위 인공 원자가 배열된 주기 및 링의 열린 부분(갭)의 폭, 입사 빔의 편광 등에 따라 다양한 각도에서 그 성능이 달라

짐을 보였다.

특히 이 연구들에서 테라헤르츠 메타물질의 크기가 파장에 비해 보다 작아지면서, SRR 구조의 열린 갭 주변에 국소적으로 모이는 전자기파의 크기가 입사하는 전자기파 대비 수배에서 수백 배 이상 증폭될 수 있다는 점이 언급되기 시작했다.

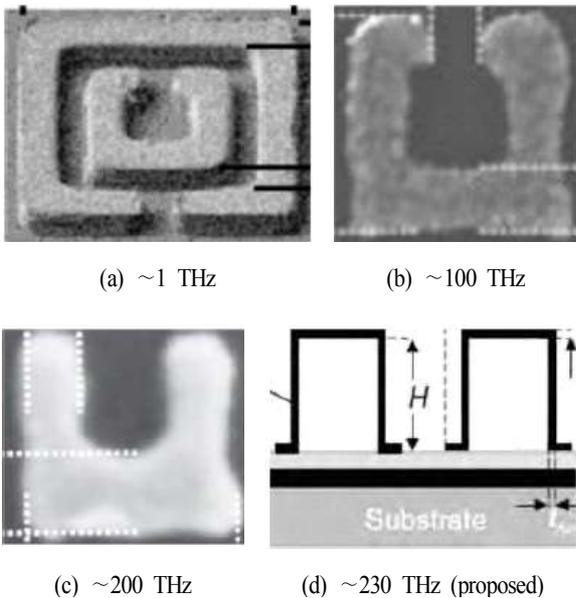
3-2 테라헤르츠 필드 집중과 증폭

테라헤르츠 메타물질의 작동 원리 및 주요 성능을 결정하는 주요 요소들을 소개하기 위하여 빛이 좁은 구멍 형태의 구조물을 통과할 때 일어나는 공명 현상을 먼저 설명하고자 한다. 금속면에 뚫린 형태로 제작되는 비어 있는 구멍의 기하학적 구조는 투과하는 빛의 공명에 결정적인 영향을 준다. 본 연구에서 주로 다루고 있는 메타물질의 일종인 사각 구조물 어레이는 흡사 막대 모양의 안테나(dipole antenna)에서 안테나의 길이에 해당되는 파장의 전자기파의 공명이 일어나는 것과 같은 원리로 공명을 일으킨다. 그 관계식은 아래와 같이 표현할 수 있다. 이때, 안테나의 길이 l 은 공명이 일어나는 주파수의 두 배(혹은 반파장)에 해당된다. 이 경우, 금속 안테나와 같은 조건으로 외부가 금속 면이고, 내부가 비어 있는 구멍 구조 형태의 안테나를 생각할 수 있으며, 이를 슬릿(구멍) 안테나라고 부른다. 따라서 슬릿 안테나의 길이를 다르게 만들어 공명 주파수를 원하는 대로 조절할 수 있다.

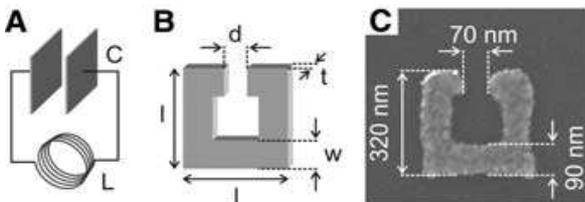
$$l = \frac{1}{2}\lambda = \frac{1}{2}k\frac{c}{f}$$

금속 막대 형태가 아니라 가운데가 비어 있는 슬릿 형태의 안테나를 사용할 경우, 액상 등의 분자 샘플을 도포하여 측정하기에 좀 더 유리한 면이 있다. 이러한 슬릿 안테나에서 사각 구조물의 길이에 의해 결정되는 공명 현상은 구조의 폭이 좁아져도 같은 양의 빛이 통과하기 위해 폭이 작아질수록 빛의 세기가 더 커져야 한다. [그림 6]에서 보여주는 것은 금속 면으로 둘러싸인 슬릿의 폭이 줄어들수록 투과하는 테라헤르츠 전기장의 크기가 더욱 커지게 되는 현상을 관찰한 실험 결과이다^[6].

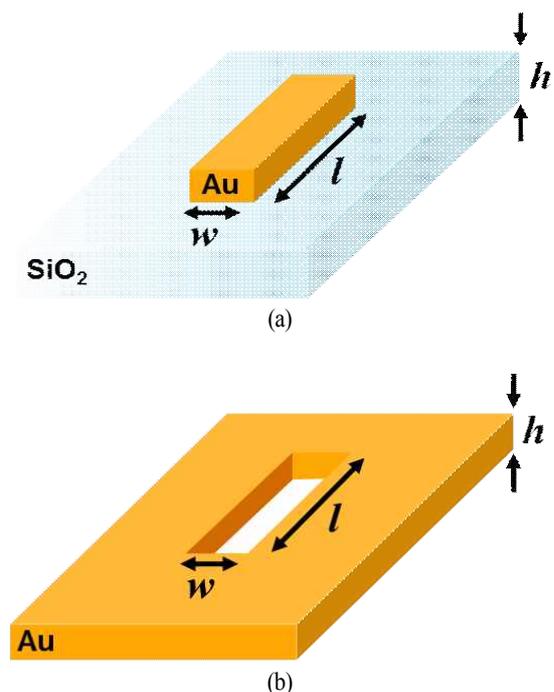
한편, 파장보다 훨씬 작은 크기의 구조물들은 빛의 회절



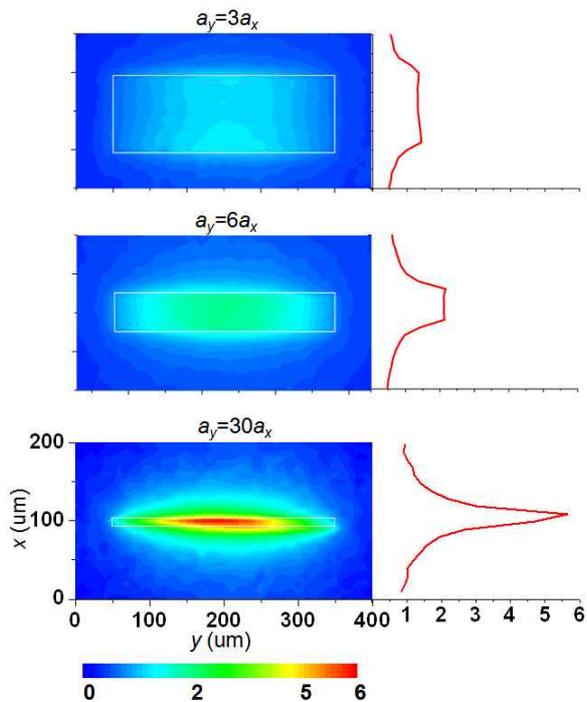
[그림 3] 테라헤르츠 대역의 SRR 구조의 크기 변천



[그림 4] 일반적인 LC 회로로 근사되는 테라헤르츠 SRR 구조^[5]



[그림 5] 같은 폭과 길이 구조를 갖는 쌍극 안테나(a)와 슬릿 안테나(b)

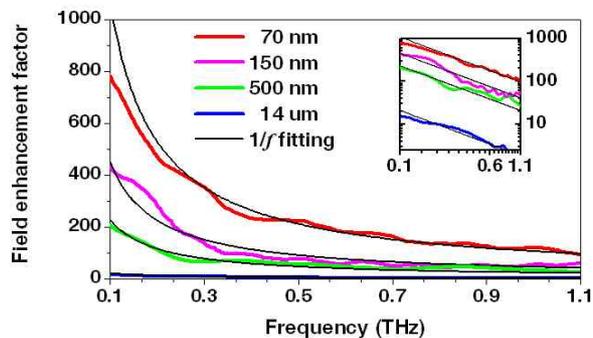


[그림 6] 사각 구멍의 폭에 의해 결정되는 전기장의 크기^[6]

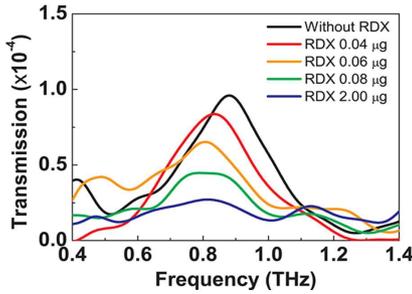
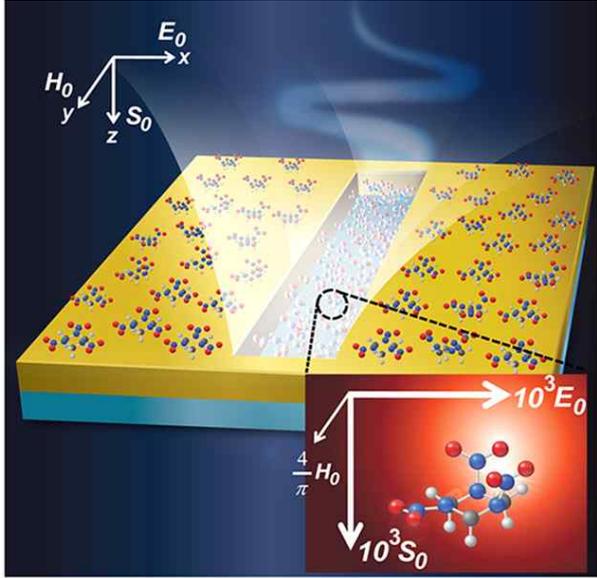
한계 때문에 빛과 상호작용이 어렵다고 알려져 왔으나, 플라즈몬 효과 등으로 인해 파장의 1/10 크기의 주기적으로 배열된 구멍을 빛이 통과하는 현상이 실험적으로 관찰되었다^[7]. 이러한 현상은 곧 테라헤르츠 영역에서도 관찰되었으며, 이때 사용된 메타물질의 일종인 사각 구조물(슬릿 안테나)의 길이에 의해 특정 주파수에서의 투과 공명이 일어난다.

투과 또는 반사하는 테라헤르츠 전기장은 이 슬릿 안테나의 가운데 위치에서 강하게 집중되면서 면적 대비 전기장이 증폭된다. 슬릿 안테나의 길이가 길수록 낮은 주파수(긴 파장) 쪽에서 공명이 일어나며, 폭이 좁아질수록 빛은 더욱 높은 밀도로 집중되고 증폭될 수 있다. 가령 테라헤르츠파가 파장의 $\lambda/10,000$ 크기인 70 nm 정도 폭의 좁고 긴 슬릿을 지나는 경우, 슬릿 양단으로 모인 전하가 금속 표면에 유도 전류를 형성하고, 매우 큰 전기장을 형성한다. 이때 면적당 투과되는 테라헤르츠 전기장은 실험적으로 800배(이론상으로는 1000배) 정도 증폭되는 것이 관찰되었다([그림 7])^[8].

빛의 회절 한계를 극복할 수 있는 메타물질을 이용하면 테라헤르츠파의 세기를 집중 및 증폭시킬 수 있으며, 이는 동시에 분자의 흡수단면도를 증가시킨다는 연구 결과가 보고되었다([그림 8])^[9]. 이 연구에서는 기존의 테라헤르츠 분광법으로는 검출할 수 없었던 극미량의 RDX 분자(폭발물 분자)를 테라헤르츠 메타물질을 이용해 검출하는 방법을 소개하였다. RDX 분자는 테라헤르츠 주파수 대역에 고유의 흡수 피크(공명 주파수)를 가지고 있으며, 메타물질을 이용하여 흡수 피크가 있는 주파수에서의 흡수단면도를 선택적으로 증폭시켜 미량의 RDX 분자를 검출하는 원리이다. RDX와 같은



[그림 7] 파장 대비 좁은 폭을 가진 슬릿을 투과하는 테라헤르츠파 전기장 증폭 현상



[그림 8] 미량의 RDX를 검출하는 테라헤르츠 메타물질 구조와 RDX 농도에 따른 투과율 변화^[9]

주파수에서 공명주파수를 가지는 폭 50 나노미터(nm) 너비의 금속 나노 슬랏 안테나를 이용하면 검출에 필요한 시료의 양이 안테나가 없을 때에 비해, 천만배 정도 줄어든다는 것을 발견하였다. 특히 이때 메타물질로 이용되는 나노 슬랏 안테나의 폭이 좁아질수록 분자의 흡수단면도는 훨씬 증가하는 관계를 갖게 된다. 이러한 방법으로 다양한 분자를 미량으로 검출하는 센서로의 활용이 크게 기대된다.

이 때, 측정하고자 하는 분자 샘플의 고유 흡수 스펙트럼과 테라헤르츠 메타물질의 공명 주파수를 적절하게 맞추어 디자인 하는 것이 매우 중요하다. 측정하고자 하는 주파수 대역에서 공명이 일어나도록 하는 것은 앞서 소개한 것과 같이 슬랏 안테나의 길이는 조절함으로써 가능하다.

특정 주파수에서 공명을 일으키는 슬랏 안테나 형태의

메타물질을 이용하여 분자의 흡수 단면도를 증가시키는 것에서 중요한 요소는 슬랏 안테나의 폭이다. 앞에서 설명한 것과 같이 슬랏의 폭이 좁아질수록, 투과하는 테라헤르츠 전기장의 세기는 증폭되며, 도포된 분자의 흡수 단면도도 커진다. 이는 곧 센서의 민감도가 올라간다고 볼 수 있다.

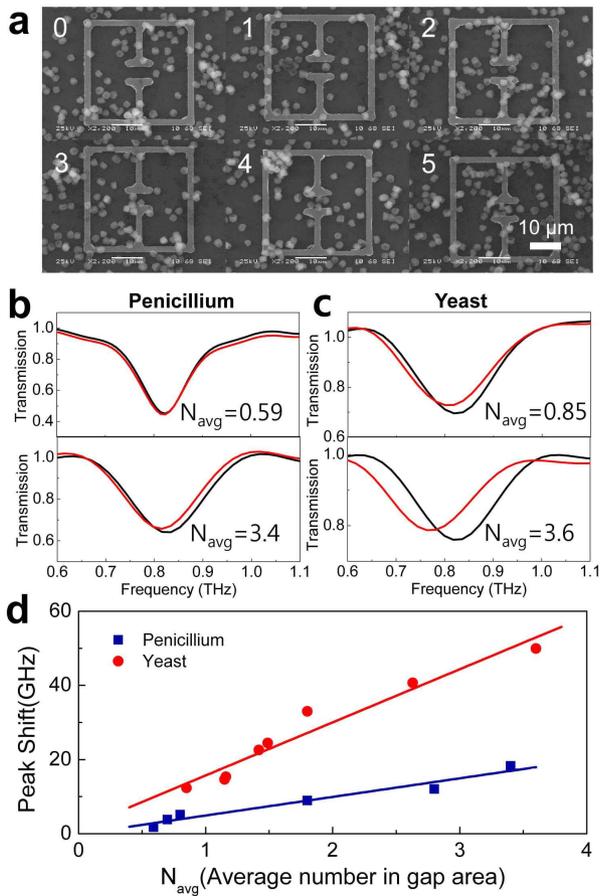
다음으로 중요하게 고려해야 할 요소는 도포된 샘플에 따른 공명 주파수의 이동(shift)이다. 공명 주파수는 메타물질을 이루는 안테나의 길이에 상관이 있으면서 동시에 시료의 굴절률과도 밀접한 관계가 있다. 슬랏 안테나 주변에 유전 물질이 있을 경우, 그 유전 물질의 굴절률에 의한 공명 주파수의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있으며^[10], 안테나 주변 물질의 굴절률이 클수록 공명 주파수는 낮은 주파수 대역으로 이동한다. 이때 l 은 슬랏 안테나의 긴 축의 길이이며, n 은 복소 굴절률의 실수부이다.

$$f_{res} = \frac{c}{\lambda_{res}} = \frac{c}{\sqrt{2(n^2+1)}l}$$

물질에 따라 테라헤르츠 주파수 대역에서의 굴절률이 다르기 때문에, 메타물질 위에 도포된 시료의 종류에 따라서 공명 주파수가 이동하는 정도가 달라진다. 다음의 연구에서는 효모(yeast)와 곰팡이균(Penicillium) 등의 미생물이 테라헤르츠-메타물질 위에 소량 도포되었을 때 그 양에 의존하여 공명 주파수가 이동하는 것을 보였다([그림 9])^[11]. 이때 사용된 메타물질은 대표적으로 알려진 SRR 구조이며, SRR 구조의 열린 갭 주변에 놓인 미생물 대상체의 개수가 늘어남에 따라 공명 주파수의 이동 정도가 커진다. 이때, 대상체의 개수에 대한 공명 주파수의 이동 정도를 나타낸 그래프 [그림 9]의 기울기는 대상체의 종류에 따라 다르기 때문에 테라헤르츠 메타물질이 고감도 미생물 분자 인식 센서로 이용될 수 있음을 보였다. 미생물의 경우, 분자 구조가 매우 복잡하여 테라헤르츠 흡수 피크가 없는 경우이며, 따라서 물질 고유의 흡수 피크 존재 여부에 상관없이 테라헤르츠 메타물질이 분자 인식 센서에 이용될 수 있음이 밝혀졌다.

IV. 고민감도 고선택성 테라헤르츠 분자 센서

4.1 테라헤르츠 메타물질을 이용한 당 분자 센서



[그림 9] 미량의 곰팡이균과 효모의 도포된 양과 테라헤르츠 공명 주파수의 이동정도

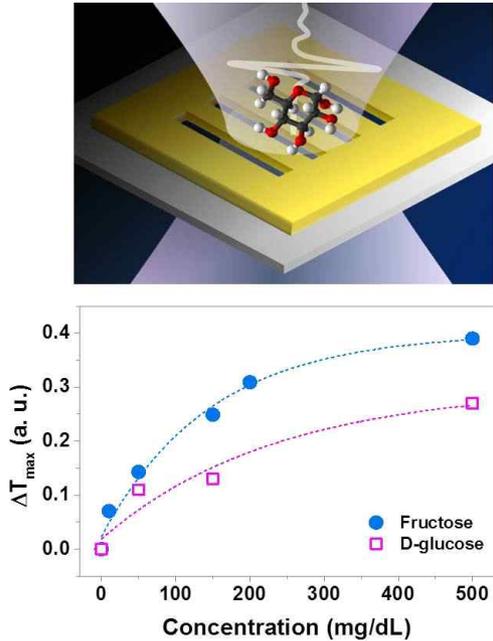
테라헤르츠 분광법의 대표적인 응용 분야로 여러 가지 분자 센싱을 들 수 있으며, 미량의 분자를 검출하기 위해 메타물질을 이용할 수 있음을 앞 장에서 보였다. 이러한 고감도 테라헤르츠 센싱법을 적용하는데 있어 분자 고유의 공명 주파수와 굴절률은 핵심적인 역할을 한다. 종류가 수십 가지가 넘지만 분자식이 서로 비슷하여 쉽게 구별하기 힘든 것 중의 하나가 당류(sugar, saccharide)이다. 특히 알려진 성인병 중 일반인에게 가장 흔한 질병 중의 하나인 당뇨병의 경우, 지속적인 혈당의 정밀 측정이 매우 중요하다. 기존의 혈당 측정법이 당류의 정밀한 구별이 되지 않고, 채혈을 기반으로 하는 방법임을 감안할 때, 비침습 방식을 구현할 수 있는 광학 기반 정밀 센서에 대한 연구는 매우 절실하다. 분자식이 비슷한 당을 선택적으로 구별하는 것은 매우 어려운

일이며, 특히 샘플이 미량일 경우 그 검출은 더욱 힘들어진다. 기존의 대부분의 당 센싱 기술들은 높은 농도 상태의 당 샘플에서 선별이 이루어지고 있으며, 현재의 화학적인 방법으로는 수십에서 수백 mM(밀리 몰) 정도의 농도 이상에서 당을 구별할 수 있다. 그러나 이것은 실제 혈액 등에서 존재하는 혈당의 수치보다 매우 높은 농도(수십 배에서 백배 이상) 정도가 되는 고농도이다. 저농도에서 당류를 구별하기 위해 앞 장에서 소개했던 방식의 테라헤르츠파 메타물질을 응용할 수 있다^[12].

메타물질은 그 구조물의 길이나 폭을 이용하여 원하는 주파수에서 공명이 일어나게 디자인할 수 있으며, 혈당(glucose)의 고유 흡수 주파수인 1.4 THz에서 공명이 일어나는 메타물질(glucose-antenna)을 디자인하였다. 이 경우, 메타물질 없이는 전혀 검출할 수 없는 수 mM 농도의 저농도 샘플에서도 혈당이 검출되었다. 좀 더 흥미로운 것은 1.4 THz에 큰 흡수가 없고, 다른 주파수에서 흡수가 있는 당류들에 대한 선택성이다. 예를 들어, 1.7 THz에서 높은 고유 흡수 피크를 가지는 과당(fructose)이나 1.8 THz에서 고유 흡수 피크를 가지는 설탕(sucrose) 등이 대표적인 예이다. 과당이나 설탕은 음식물이나 음료 등에 포함된 당류의 대표적인 예이며, 이 경우 1.4 THz에서 공명이 있는 메타물질(glucose-antenna)을 이용하면, 혈당을 제외한 다른 당류는 쉽게 검출되지 않는다.

이러한 방법을 통해 선택적으로 특정 당류만 민감하게 검출하고, 나머지 당류에는 둔감한 센서를 만들 수 있게 된다. 마찬가지로 원리로 측정하고자 하는 물질이 과당인 경우, 1.7 THz에서 공명이 일어나는 메타물질(fructose-antenna)을 사용하면 선택으로 미량의 과당만 측정할 수 있다. [그림 8]에서와 같이 당류에 맞게 고안된 각종 안테나에 미량의 당류를 액상으로 도포한 후에 테라헤르츠 투과율의 변화 정도를 살펴보면, 사용된 당의 종류에 따라 그 변화 추이(그래프의 기울기)가 다르게 나타난다. 이는 사용된 테라헤르츠 메타물질의 종류에 따라 미량의 시료에서도 높은 선택성을 갖는 센서를 만들 수 있음을 시사한다. 이와 같은 방법은, 테라헤르츠 영역에서 강한 고유 흡수 주파수를 가지는 다른 분자의 경우에도 널리 적용시킬 수 있다.

4.2 테라헤르츠 메타물질을 이용한 잔류 농약 검출



[그림 10] 테라헤르츠 메타물질 (sugar-antenna)을 이용한 미량의 당류 검출

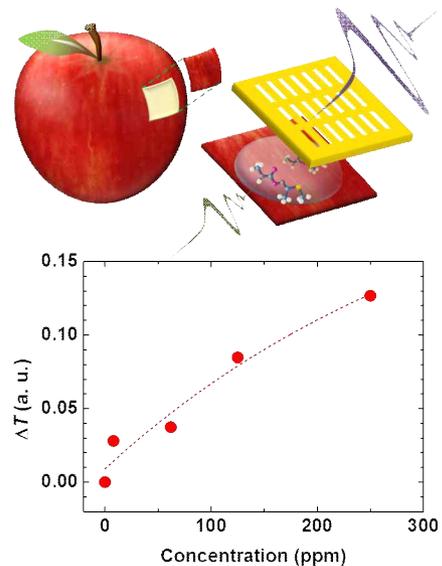
전자기파를 집속 및 증폭시키는 기술은 테라헤르츠 영역에서 고유 흡수 피크를 갖는 물질을 미량 검출하는데 이용될 수 있으며, 이를 잔류 농약 검출에도 응용하고자 한다. 농작물을 병과 해충으로부터 보호하기 위해 각종 농약이 개발되어 사용되어 왔으나, 농작물 속에 미량 흡수되어 남아있는 문제가 발생하여 유통 전 잔류 농약을 검출하여 안전관리가 필요한 상황이다. 이때, 잔류 농약은 농작물의 표면에 주로 흡수되어 있으나, 직접적인 검출이 쉽지 않아, 주로 추출, 분배, 정제, 기기 내 성분 분석 순으로 복잡한 과정과 단계를 거쳐야만 하며, 이는 수 시간을 필요로 한다. 이러한 복잡한 과정을 거치지 않고, 단시간 내 비파괴 검사가 가능한 테라헤르츠 메타물질을 이용한 비접촉 측정법을 소개하고자 한다.

이 연구에서 측정 대상이 되는 살충제 성분들은 테라헤르츠 영역에서 고유 흡수 피크를 가지고 있으며(Methomyl의 경우 1.0 THz), 같은 주파수에서 공명이 생기도록 메타물질을 디자인하였다. 이 메타물질에 적당량의 시료를 도포한 뒤에 테라헤르츠 전자기파를 투과시키면, 투과된 테라헤르츠 전자기파는 타겟이 된 농약 시료에만 반응하여 증폭된 신호를 준다. 투과 혹은 반사 형태의 테라헤르츠 신호는 메타물질

위에 도포된 농약 샘플의 농도가 높아질수록 변화량이 크다 (그림 11). 이와 같은 원리로 여러 가지 종류가 다른 농약을 선택적으로 구분할 수 있다. 이때 사용되는 테라헤르츠 분광 시스템은 실제 비파괴 검사로 발전시키기 위해서는 반사법이 좀 더 유리하다. 반사법을 택하게 될 경우, 샘플을 투과하지 않고 표면에서 반사되는 신호만 측정하여 대상체를 파괴하거나 추출하지 않고, 실시간 측정이 가능하게 된다. 이 경우, 사용되는 테라헤르츠 메타물질의 경우, 수십에서 수백 나노 폭을 가지는 슬릿 안테나 어레이로 이루어지며, 대상 물질은 수 ppm에서 수백 ppb 급의 미량까지도 검출이 가능하다. 이 방법으로 단시간 대량 샘플에 대한 잔류 농약 존재 유무에 대한 일차적 스크리닝이 가능할 것으로 여겨진다.

V. 결론 및 전망

본 원고에서 물질의 고유 흡수 피크에 공명 주파수를 맞춘 메타물질을 이용하여 테라헤르츠 영역에서 미량의 생화학 분자를 매우 높은 민감도로 측정할 수 있는 방법을 소개하였다. 이를 위해 특정 테라헤르츠 주파수에서 강한 공명을 일으키는 메타물질의 원리와 제작 방법을 먼저 소개하였다. 메타물질을 이용한 테라헤르츠파의 국소적인 집속과 필



[그림 11] 테라헤르츠 메타물질을 이용한 과일 표면에서의 잔류 농약 검출

드 증폭은 낮은 에너지를 가진 테라헤르츠 전자기파와 물질의 상호작용을 좀 더 높이는 역할을 하여 앞으로 다양한 분야에 응용될 수 있는 가능성을 보인다. 특히, 이 원고에서 소개하는 테라헤르츠 메타물질을 활용한 분자 센싱은 물질의 분광법에 널리 이용되고 있는 테라헤르츠 기술의 장점과 높은 민감도와 집적도를 지닌 메타물질의 특성을 모두 반영하는 적절한 응용사례가 될 것이다.

이러한 초고감도 테라헤르츠 분자 센서는 투과법을 통해 낮은 농도에서 선별이 어렵다고 알려진 당류를 선택적으로 검출하는데 이용될 수 있고, 반사법을 통해 과일을 분해하지 않은 상태에서 미량의 잔류 농약을 검출할 수 있는 스크리닝법으로 응용될 수 있는 가능성을 보였다.

이 방법으로 바이러스나 단백질 등의 미생물 미량 검출 및 유해가스 등의 센싱도 가능할 것으로 기대된다. 특히 사회적으로 이슈가 되고 있는 각종 신종 바이러스의 경우, 세부 아형의 확인을 위해서는 RNA 염기서열의 확인이 필수적이나, 감염판별이 필요한 생물시료의 개수가 방대하여 막대한 시간 및 비용이 소요되곤 한다. 이러한 경우, 테라헤르츠 메타물질 기반 센싱 틀은 신속한 일차 스크리닝에 이용될 수 있으며, 생물 분자의 양에 대해 다르게 측정되는 테라헤르츠 투과 값을 이용하여 생물 분자의 정량 분석에도 바로 이용할 수 있어 여러 가지 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, 47 (11), pp. 2075-2084, 1999.
- [2] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", *Physical Rev. Lett.*, 84, p. 4184, 2000.
- [3] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Science*, 292 (5514), pp. 77-79, 2001.
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. C. Nemat-Nasser and S. Schultz, "Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial," *Appl. Phys. Lett.*, 78, p. 489, 2001.
- [5] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny and C. M. Soukoulis, "Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz", *Science*, 306(5700), pp. 1351-1353, 2004.
- [6] M. A. Seo, A. J. L. Adam, J. H. Kang, J. W. Lee, K. J. Ahn, Q. H. Park, P. C. M. Planken and D. S. Kim, "Near field imaging of terahertz focusing onto rectangular apertures", *Optics Express*, 16, p. 20484, 2008.
- [7] C. Genet, T. W. Ebbesen, "Light in tiny holes", *Nature*, 445, p. 39, 2007.
- [8] M. A. Seo, H. R. Park, S. M. Koo, D. J. Park, J. H. Kang, O. K. Suwal, S. S. Choi, P. C. M. Planken, G. S. Park, N. K. Park, Q. H. Park and D. S. Kim, "Terahertz field enhancement by a metallic nano slit operating beyond the skin-depth limit", *Nature Photonics* 3, p. 152, 2009.
- [9] H. R. Park, K. J. Ahn, S. Han, Y. M. Bahk, N. Park and D. S. Kim, "Colossal absorption of molecules inside single terahertz nanoantennas", *Nano Letters*, 13, p. 1782, 2013.
- [10] J.-H. Kang, J. -H. Choe, D.-S. Kim and Q. H. Park, "Substrate effect on aperture resonances in a thin metal film", *Opt. Express*, 17, p. 15652, 2009.
- [11] S. J. Park, J. T. Hong, S. J. Choi, H. S. Kim, W. K. Park, S. T. Han, J. Y. Park, S. Lee, D. S. Kim and Y. H. Ahn, "Detection of microorganisms using terahertz metamaterials", *Sci. Rep.*, 4, p. 4988, 2014.
- [12] D. K. Lee, J. H. Kang, J. S. Lee, H. S. Kim, C. Kim, J. H. Kim, T. Lee, J. H. Son, Q. H. Park and M. Seo, Highly sensitive and selective sugar detection by terahertz nanoantennas, "arXiv: 1506.08363", 2015.

≡ 필자소개 ≡

서 민 아



2003년 2월: 이화여자대학교 물리학과 (이학사)

2005년 2월: 서울대학교 물리천문학부 (이학석사)

2010년 2월: 서울대학교 물리천문학부 (이학박사)

2010년 6월~2013년 9월: 미국 Los Alamos National Laboratory, 박사후연구원 (fellow)

2013년 10월~현재: 한국과학기술연구원 선임연구원

[주 관심분야] 테라헤르츠 분광 및 초고속 광학, 메타물질 및 반도체 나노 물질