

테라헤르츠 비대칭 분리고리공진기 메타물질의 높은 품질인자를 위한 공진 특성에 관한 연구

박대준, 류한철*
삼육대학교 융합과학과

A Study on Resonance Properties of a Terahertz Asymmetric Split-Loop Resonator Type Metamaterial for High Quality Factor

Dae-Jun Park, Han-Cheol Ryu*

Dept. of convergence science, Sahmyook University

요약 본 논문에서는 높은 감도의 테라헤르츠 센서로 응용이 가능한 고품질 비대칭 분리고리공진기(ASLR: Asymmetric Split-Loop Resonator) 메타물질의 구조적인 비대칭 정도에 따른 ASLR의 공진특성 변화를 전자기 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 특히, ASLR의 구조적 비대칭성은 높은 품질인자를 갖는 파노공진을 발생시키므로 ASLR의 비대칭성 정도에 따라서 ASLR 고유공진과 파노공진의 공진주파수 변화와 투과계수 및 품질인자의 변화를 분석하였다. 또한, ASLR의 구조적 비대칭성에 따른 ASLR의 공진 특성 변화의 원인을 분석하기 위해 표면전류밀도를 계산하여 ASLR 공진의 공진주파수, 투과계수, 그리고 품질인자가 변화하는 이유를 분석하였다. 이를 통하여 ASLR 고유공진의 표면전류밀도는 이중 극자를 형성하여 높은 방사 손실을 가지게 되므로 품질인자가 낮아지게 되고, 파노공진의 표면전류밀도는 단한 모드 또는 사중 극자를 형성하여 이중 극자에 비하여 낮은 방사 손실을 가지므로 파노공진 상태의 ASLR이 높은 품질인자를 가지게 됨을 확인하였다. 이러한 ASLR의 파노공진 특성 분석 결과를 바탕으로 메타물질의 비대칭성을 조절하면 높은 품질인자를 가지는 테라헤르츠 고성능 필터 또는 고감도 센서 개발이 가능하다. 이러한 고감도 고성능 테라헤르츠 소자 개발은 테라헤르츠 메타물질의 실질적인 산업 응용을 유도할 것으로 기대한다.

Abstract A terahertz asymmetric split-loop resonator (ASLR) was analyzed for use in high-sensitivity sensing applications. Its structural asymmetry induces an asymmetric Fano resonance which has a high quality factor compared to the symmetric eigen-resonance. The variations of the resonant frequency, transmission coefficient, and quality factor of the ASLR in the eigen and Fano resonances are analyzed as a function of its structural asymmetry. Also, the surface current densities on the ASLR in both resonances are calculated to analyze the main cause of the variations of its transmission characteristics. The surface current of the ASLR in the eigen resonance shows a dipole resonance, which increases the radiation loss and reduces the quality factor. On the other hand, the surface current of the ASLR in the Fano resonance shows a trapped or quadrupole mode which has a low radiation loss. Therefore, the ASLR operated in the Fano resonance has a high quality factor. Terahertz, high-performance filters and high sensitivity sensors can be developed based on our analysis results of the ASLR having a high quality factor. These high-performance devices based on terahertz metamaterials could increase the adoption of terahertz industrial applications.

Keywords : Terahertz, Metamaterial, Asymmetric split-loop resonator, Fano resonance, Quality factor

본 논문은 2015년도 삼육대학교 학술연구비 지원에 의하여 쓰인 것임.

*Corresponding Author : Han-Cheol Ryu (Sahmyook University)

Tel: +82-2-3399-1801 email: hryu@syu.ac.kr

Received September 22, 2016

Revised (1st October 18, 2016, 2nd October 20, 2016)

Accepted November 10, 2016

Published November 30, 2016

1. 서론

테라헤르츠파(Terahertz Wave)는 마이크로파와 원적외선의 중간 영역에 해당하는 0.1 ~ 10 THz 대역 주파수 영역의 전자기파를 말한다. 테라헤르츠파는 전파의 투과성과 광파의 직진성을 동시에 가지며 고유 에너지가 낮아 인체에 무해하다. 테라헤르츠파는 다양한 물질의 분자 진동 주파수가 테라헤르츠 대역에 포함되어 있어 물질의 분자 인식과 재료 특성을 검출하고 구별하는 분광 시스템 응용에 유용하다 [1]. 또한, 검출한 분광 특성을 형상적으로 구현하는 이미징 시스템과 넓은 주파수 대역폭을 활용한 초고속 무선통신시스템 등 매우 다양한 분야에 응용이 가능한 차세대 기술로 많은 연구가 진행되고 있다 [2, 3]. 그러나 대부분의 테라헤르츠파 기술에 대한 연구가 테라헤르츠파의 생성 및 검출과 그 특성을 이용한 분야에 집중되어 왔기 때문에 테라헤르츠 대역에서 사용 가능한 실질적인 소자의 개발은 마이크로파나 광파 대역에 비교하여 매우 부족한 상황이다. 테라헤르츠파 기술을 보다 다양한 분야에 응용하기 위해서는 다양한 종류의 능동 및 수동 소자들의 개발이 필요하다. 하지만 대부분의 자연계 물질들은 그 전기적, 자기적 특성이 테라헤르츠파 주파수 대역에서 소자로 활용되기에 적합하지 않은 문제를 갖고 있다. 그렇기 때문에 인공적으로 전기적, 자기적 특성을 제어할 수 있는 메타물질(Metamaterial)을 테라헤르츠파의 소자로서 응용하는 연구에 많은 관심이 집중되고 있다. 메타물질은 파장보다 작은 크기의 유닛 셀(Unit Cell)을 금속이나 유전체를 이용하여 형성하고 주기적으로 배열하여 전체 구조를 균일한 물질로 인식하도록 만든 물질로서 자연계에는 존재하지 않는 특이한 성질인 음의 굴절률이나 투명한 형상 등을 만들 수 있어 다양한 분야에서 활발한 연구가 이루어지고 있다 [4, 5]. 메타물질은 테라헤르츠 대역에서 광학주파수 대역보다 쉽게 일반적인 광리소그래피(Photo-lithography) 기술을 이용하여 제작이 가능하다는 장점으로 인해 주파수 필터(Frequency Filter)나 바이오센서(Bio Sensor)등의 소자로 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다 [6, 7]. 메타물질을 테라헤르츠 대역의 필터나 센서 등의 소자로 활용하여 감도가 높은 반응을 얻기 위해서는 품질인자(Quality Factor)가 높은 메타물질이 필요하다. 하지만, 메타물질의 저항손실(Ohmic Loss)이나 방사손실(Radiation-Loss) 등으로 인하여 높은 품

질인자를 갖는 메타물질을 형성하기란 어렵다. 특히, 메타물질의 방사손실은 높은 품질인자의 공진을 얻는데 큰 문제가 된다 [8]. 이러한 메타물질의 방사손실을 억제하기 위하여 파노공진(Fano Resonance)을 얻기 쉬운 비대칭 형상을 가지는 메타물질에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다 [9, 10]. 파노공진은 파노형태(Fano Shape)의 비대칭적인 형상을 나타내는 공진으로 일반적인 공진에 비하여 상대적으로 높은 품질인자를 가지며 공진주파수와 공진대역폭을 제어하는 것이 용이하다 [11]. 근래에는 분리고리공진기의 구조를 비대칭화하여 형성함으로서 테라헤르츠 대역에서 파노공진을 발생시키고 공진 특성을 제어하는 메타물질이 활발히 연구되고 있다 [12~15].

본 논문에서는 고리공진기 내부에 캡을 형성하여 서로 다른 크기를 가지는 상부 구조체와 하부 구조체로 구성된 비대칭 분리고리공진기(ASLR: Asymmetric Split-Loop Resonator)를 설계, 해석하였다. 설계한 테라헤르츠 대역 ASLR은 기본 구조에서 기인하는 고유공진과 상부 구조체와 하부 구조체의 구조적인 비대칭성으로부터 발생하는 파노공진이 나타난다. 이러한 고유공진과 파노공진은 ASLR의 구조적인 비대칭 비율에 따라서 공진주파수, 투과계수, 그리고 품질인자가 변화하는 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 ASLR의 공진특성을 해석하기 위하여 ASLR의 구조적인 비대칭 정도에 따른 ASLR의 공진특성 변화를 분석하였다. 또한 ASLR의 공진주파수에서 표면전류밀도를 계산하여 구조적 비대칭성에 따른 ASLR의 공진특성 변화의 원인을 분석하였다. 이러한 구조적 비대칭성으로 인하여 발생하는 파노공진으로 높은 품질인자를 가지게 되는 ASLR의 공진특성 분석 결과는 높은 품질인자를 필요로 하는 테라헤르츠 대역 필터나 고감도 센서 등의 고품질 테라헤르츠 메타물질 소자 개발에 응용이 가능할 것으로 기대된다.

2. 본론

메타물질은 형성하는 물질의 성질보다 구조적인 형상으로부터 발생하는 전자기적 효과에 의하여 그 특성이 결정되므로 비대칭 구조를 이용하여 높은 품질인자를 구현할 수 있다. ASLR은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 마주보고 있는 평행한 두 구조 각각에 캡(Gap)을 형성하고

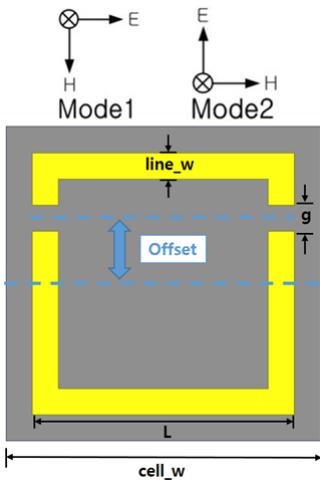


Fig. 1. Schematic of an asymmetric split-loop resonator (ASLR)

두 캡의 위치를 중심에서 벗어나게 하여 비대칭한 구조를 이용으로서 높은 품질인자를 가지는 파노공진을 유도할 수 있다. ASLR의 테라헤르츠 공진 특성을 전자기파 시뮬레이터인 Ansys 사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 분석하였다. ASLR은 $200\text{ }\mu\text{m}$ 두께의 실리콘(Si) 기판 위에 200 nm 두께의 금(Au)을 사용하여 형성하였다.

ASLR의 1 THz 대역 공진을 위하여 단위격자길이($cell_w$)는 $60\text{ }\mu\text{m}$, 형성된 ASLR 패턴 형상은 정사각형으로 가로, 세로 길이(L)는 $50\text{ }\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 메타물질을 형성하는 금속선의 두께($line_w$)와 캡의 크기(g)는 일반적인 광리소그래피 기술로 쉽게 구현하기 위하여 $5\text{ }\mu\text{m}$ 로 설정하였다. ASLR의 비대칭성을 결정하는 오프셋(Offset) 길이는 메타물질 유닛 셀의 중심과 ASLR 내부 캡의 중심 사이 길이를 나타내는 것으로 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 간격으로 $17.5\text{ }\mu\text{m}$ 까지 변화시켰다. ASLR의 공진 특성은 입사되는 테라헤르츠파의 전계 방향에 따라 다르므로, 전계의 방향이 캡과 수직한 경우를 모드 1, 캡과 평행한 경우를 모드 2로 구분하여 계산하였다. Fig. 2는 오프셋 길이에 따른 ASLR의 모드 1 공진 특성을 나타낸다.

ASLR은 오프셋 길이가 $0\text{ }\mu\text{m}$ 일 때 대칭적인 구조인 분리고리공진기(SLR-Split-Loop Resonator)로 형성된다. 이 오프셋 길이가 $0\text{ }\mu\text{m}$ 일 때 SLR은 대칭적인 구조를 가지므로 파노공진이 나타나지 않고, 790 GHz 의 공진주파수에서 약 750 GHz 의 넓은 공진대역폭을 갖는 고유공진(Eigen Resonance)만 나타난다. 이러한 고유공

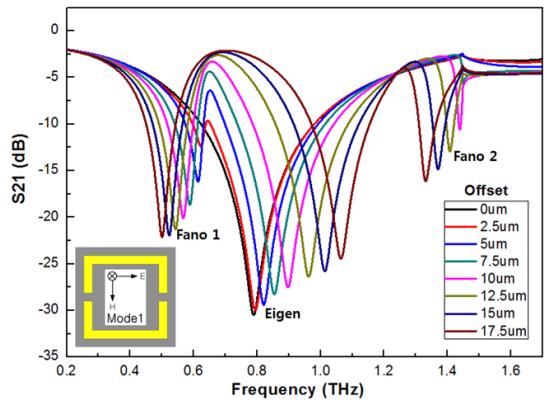


Fig. 2. Transmission coefficients (S_{21}) of an ASLR operated in mode 1 according to the variation of the offset length.

진은 오프셋 길이가 증가함에 따라 공진주파수가 높아지고 테라헤르츠파 투과량은 증가한다. 오프셋 길이가 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 이상인 구조에서부터 SLR에 비대칭성이 나타나 ASLR로 형성되어 고유공진이 일어나는 공진 주파수보다 낮은 주파수 대역에서 파노공진 1이 발생한다. 오프셋 길이가 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 인 ASLR의 파노공진 1은 623 GHz 의 공진주파수와 -12.4 dB 의 투과계수(S_{21})를 갖는다. 파노공진 1의 공진주파수는 오프셋 길이가 증가함에 따라 낮아지면서 테라헤르츠파 투과량은 줄어들어 공진의 깊이는 커지고 파노 형상은 줄어든다. 고유공진의 공진 주파수보다 높은 주파수 대역에서 발생하는 파노공진 2는 오프셋 길이가 $10\text{ }\mu\text{m}$ 이상 일 때부터 나타나며, $10\text{ }\mu\text{m}$ 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR은 1.4 THz 의 공진 주파수에서 -10.6 dB 의 투과계수를 갖는다. 파노공진 2는 오프셋 길이가 증가함에 따라 공진주파수가 낮아지며 동시에 테라헤르츠파 투과량은 줄어든다. 파노공진 2도 파노공진 1과 같이 오프셋 길이가 증가함에 따라 공진 형상이 확대되며 파노 형상은 완화되는 특성을 보인다. 오프셋 길이 변화에 따른 ASLR의 고유공진과 파노공진 1, 파노공진 2의 품질인자의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 고유공진은 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 의 오프셋 길이에서 파노공진 1의 생성으로 인한 영향으로 대역폭이 감소하여 일시적으로 품질인자가 상승하지만 오프셋 길이가 증가함에 따라 점점 낮은 품질인자를 갖는다. 모드 1에서 동작하는 ASLR은 파노공진 1에서 최대 품질인자 28.8, 파노공진 2에서 최대 품질인자 26.1 값을 가졌다.

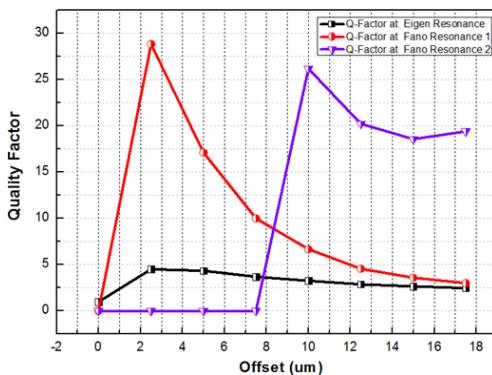


Fig. 3. Quality factors of an ASLR operated in mode 1 according to the variation of the offset length.

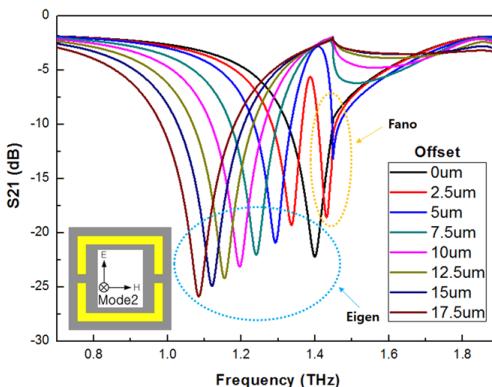


Fig. 4. Transmission coefficients (S_{21}) of an ASLR operated in mode 2 according to the variation of the offset length.

Fig. 4에 모드 2에서 동작하는 오프셋 길이에 따른 ASLR의 공진 특성 변화를 나타내었다. 모드 1과 같이 오프셋 길이가 0 μm 일 때는 파노공진이 나타나지 않고, 공진주파수 1.4 THz에서 약 400 GHz 의 넓은 대역폭을 갖는 고유공진만 나타난다. 이러한 고유공진은 비대칭성이 나타나는 2.5 μm 의 오프셋 길이에서 파노공진의 생성으로 인한 영향으로 테라헤르츠파 투과량이 늘어났다가 오프셋 길이가 증가함에 따라 테라헤르츠파 투과량은 감소하는 특성을 나타낸다. 또한, 비대칭성이 증가함에 따라 고유공진의 공진 주파수는 낮아진다. 모드 2에서 동작하는 ASLR은 고유 공진주파수보다 높은 주파수 대역에서 파노공진이 발생한다. 오프셋 길이가 2.5 μm 인 ASLR은 파노공진주파수 1.431 THz에서 -18.6 dB의 투과계수를 갖는다. 파노공진은 오프셋 길이 5 μm까지 증가함에 따라 공진주파수가 높아지고 테라헤르츠파 투과량이 늘어나면서 파노공진 특성은 유지된다. 그러나 오

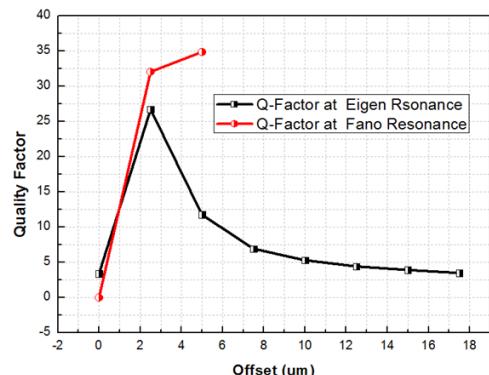


Fig. 5. Quality factors of an ASLR operated in mode 2 according to the variation of the offset length.

프셋 길이가 7.5 μm 이상을 가지는 ASLR은 과도한 비대칭성으로 인하여 파노공진 특성이 사라진다. Fig. 5는 모드 2에서 동작하는 ASLR의 고유공진과 파노공진의 오프셋 길이 변화에 따른 품질인자의 변화를 나타낸다. ASLR의 고유공진은 2.5 μm 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR이 가장 높은 품질인자 26.7을 가지고, 파노공진은 오프셋 길이가 5 μm 인 경우에 가장 높은 34.8의 품질인자를 갖는다.

Table. 1은 모드 1과 모드2에서 오프셋 길이의 순차적인 변화에 따른 ASLR의 각 공진에서의 공진주파수 변화를 나타낸다. 오프셋 길이가 길어짐에 따라 모드 1에서는 고유 공진주파수는 올라가고 파노 공진주파수는 내려가는 반면에, 모드 2에서는 고유 공진주파수는 내려가고 파노 공진주파수는 올라가는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Variation of a resonant frequency at each resonance according to the variation of the offset length.

	[GHz]							
	0 [μm]	2.5 [μm]	5 [μm]	7.5 [μm]	10 [μm]	12.5 [μm]	15 [μm]	17.5 [μm]
Eigen	791	796	822	855	898	963	1015	1064
Fano 1	-	623	615	589	568	544	524	501
Fano 2	-	-	-	-	1440	1408	1371	1332

(a) mode 1

	[GHz]							
	0 [μm]	2.5 [μm]	5 [μm]	7.5 [μm]	10 [μm]	12.5 [μm]	15 [μm]	17.5 [μm]
Eigen	1399	1336	1293	1241	1197	1155	1121	1086
Fano	-	1431	1449	-	-	-	-	-

(b) mode 2

3. 테라헤르츠 비대칭 분리고리공진기의 표면전류밀도 분석

ASLR의 구조적 비대칭성에 따른 ASLR의 공진특성 변화의 원인을 분석하기 위하여 고유 공진과 파노 공진에서 표면전류밀도를 계산하였다. Fig. 6은 모드 1에서 동작하는 ASLR의 오프셋 길이에 따른 고유공진 ((a)~(c)), 파노공진 1((d)~(f)), 파노공진 2((g)~(i))의 표면전류밀도를 나타낸다. 고유공진 상태의 ASLR은 이중극자 공진(Dipole Resonance) 특성을 보인다. 이중극자 공진은 이중극자 모멘트(Dipole Moment)가 강해져 방사 손실의 증가를 야기함으로 메타물질 공진구조의 품질 인자를 낮추는 주된 원인이 된다 [16]. 고유공진 상태의 ASLR은 오프셋 길이가 증가함에 따라 이중극자 공진 특성은 유지하면서 상대적으로 작은 상부 구조체에 더 많은 표면전류가 집중된다. 이를 통하여 상부 구조체가 고유공진 특성을 주도해 오프셋 길이가 증가함에 따라 공진주파수가 높아졌음을 유추할 수 있다. 고유공진 주파수보다 낮은 주파수 대역에서 생성되는 파노공진 1의 표면전류밀도는 2.5 μm 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR에서 닫힌 모드(Trapped Mode)를 형성한다. 닫힌 상태의 전류 분포를 가지는 메타물질은 이중극자 모멘트가

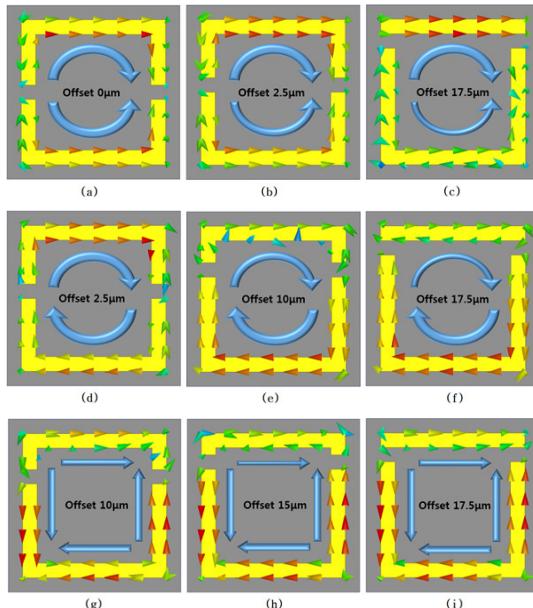


Fig. 6. Surface current density of an ASLR operated in mode 1 (a)~(c) at eigen resonance (d)~(f) at Fano resonance 1 (g)~(i) at Fano resonance 2.

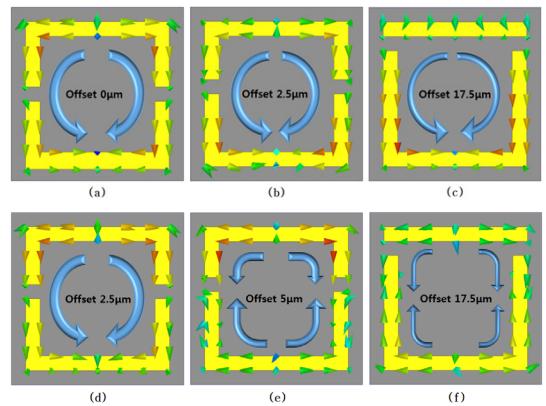


Fig. 7. Surface current density of an ASLR operated in mode 2 (a)~(c) at eigen resonance (d)~(f) at Fano resonance.

없어 방사 손실이 적어지기 때문에 높은 품질인자를 얻을 수 있다 [17]. ASLR의 파노공진 1은 오프셋 길이가 증가함에 따라 닫힌 모드 형태의 전류 밀도는 유지되지만, 상부 구조체의 전류 밀도는 줄어들고 하부 구조체의 전류밀도가 증가함을 볼 수 있다. 이를 통하여 ASLR의 오프셋 길이가 증가함에 따라 공진주파수는 감소하면서 공진 강도가 증가하는 이유를 확인할 수 있다. 고유공진 주파수보다 높은 주파수 대역에서 형성되는 파노공진 2는 오프셋길이가 10 μm 이상인 ASLR에서 나타나고, 이 경우 표면전류밀도가 사중극자(Quadrupole) 형태로 생성된다. 사중극자를 이루는 표면전류는 메타물질에 나타나는 이중극자가 두개인 경우로, 그 두 이중극자가 서로의 모멘트를 상쇄하여 방사손실의 증가를 억제하기 때문에 높은 품질인자를 얻을 수 있다 [18]. ASLR의 파노공진 2는 오프셋 길이가 증가하여도 표면전류밀도가 사중극자 형태를 유지하고, 일부 구조에서 사중극자의 형상과 다른 전류성분들이 발생하여 약간의 품질인자 손실이 나타났음을 확인할 수 있다. Fig. 7은 모드 2에서 동작하는 ASLR의 오프셋 길이 변화에 따른 고유공진((a)~(c))과 파노공진((d)~(e))의 표면전류밀도를 나타낸다.

모드 2에서 동작하는 ASLR은 고유공진 주파수에서 이중극자 공진 특성을 보이며 오프셋 길이가 증가함에 따라 이중극자 공진 특성은 유지하면서 상대적으로 큰 크기의 하부 구조체에 더 많은 표면전류가 집중된다. 이를 통하여 하부 구조체가 고유공진 특성을 주도하여 비대칭성 증가에 따라 고유공진주파수가 낮아졌음을 확인할 수 있다. 고유공진 주파수보다 높은 주파수 대역에서

생성되는 파노공진의 표면전류밀도는 $2.5 \mu\text{m}$ 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR에서 이중극자를 형성하고 $5 \mu\text{m}$ 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR에서 사중극자를 형성한다. 사중극자 표면전류는 이중극자 표면전류보다 방사손실이 적음으로 $5 \mu\text{m}$ 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR의 파노공진이 $2.5 \mu\text{m}$ 의 오프셋 길이를 가지는 ASLR의 파노공진 보다 더 높은 품질인자를 갖게 된다. 오프셋 길이 $7.5 \mu\text{m}$ 이상을 가지는 ASLR은 과도한 비대칭성으로 인하여 파노공진이 생성되지 않고, 파노공진이 생성되었던 주파수에서의 표면전류밀도(Fig. 7(f))는 사중극자의 형태를 보이지만 그 크기가 매우 작아 대부분의 테라헤르츠파가 투과되었음을 유추할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고품질 ASLR 메타물질의 구조적인 비대칭 정도에 따른 ASLR의 공진특성 변화를 전자기 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 특히, ASLR의 구조적 비대칭성은 높은 품질인자를 갖는 파노공진을 발생시키므로 ASLR의 비대칭성 정도에 따라서 ASLR 고유공진과 파노공진의 주파수 특성 변화와 투과계수 및 품질인자의 변화를 분석하였다. 또한 ASLR의 공진주파수에서 표면전류밀도를 계산하여 구조적 비대칭성에 따른 ASLR의 공진특성 변화의 원인을 분석하였다. 이를 통하여 ASLR 고유공진의 표면전류밀도는 이중 극자를 형성하여 높은 방사 손실을 가지게 되므로 품질인자가 낮아지게 되고, 파노공진의 표면전류밀도는 닫힌 모드 또는 사중 극자를 형성하여 이중 극자에 비하여 낮은 방사 손실을 가지므로 파노공진 상태의 ASLR이 높은 품질인자를 가지게 됨을 확인하였다. 또한, 비대칭성 정도에 따라 고유 및 파노 공진 상태에서 ASLR의 표면전류밀도가 ASLR의 상부와 하부 구조체 중 어느 구조체에 집중되는지를 확인하여 공진주파수 변화의 원인을 분석하였다. 이러한 ASLR의 파노공진 특성 분석 결과를 바탕으로 메타물질의 비대칭성을 조절하면 높은 품질인자를 가지는 테라헤르츠 고성능 필터 또는 고감도 센서 개발이 가능하다. 이러한 고감도 고성능 테라헤르츠 소자 개발은 테라헤르츠 메타물질의 실질적인 산업 응용을 유도할 것으로 기대한다.

References

- [1] Kawase, K.; Ogawa, Y.; Watanabe, Y.; Inoue, H. "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Optics Express*, 11, 2549, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.11.002549>
- [2] P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch, "Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications," *Laser Photon. Rev.* 5, pp. 124-166, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/lpor.201000011>
- [3] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology." *Nat. Photonics* 1, pp. 97-105, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2007.3>
- [4] J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, "Three-dimensional optical metamaterial with negative refractive index," *Nature* 455, pp. 376-379, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nature07247>
- [5] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science* 314, pp. 977-979, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1133628>
- [6] M. Choi, S. H. Lee, Y. Kim, S. B. Kang, J. Shin, M. H. Kwak, K. -Y. Kang, Y.-H. Lee, N. Park, and B. Min, "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index," *Nature* 470, pp. 369-373, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nature09776>
- [7] Christian Debus, Peter Haring Bolivar, "Frequency selective surfaces for high sensitivity terahertz sensing," *Applied Physics Letters* 91, 184102, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2805016>
- [8] Ibraheem Al-Naib, Erik Hebestreit, Carsten Rockstuhl, Falk Lederer, Demetrios Christodoulides, Tsuneyuki Ozaki, and Roberto Morandotti, "Conductive Coupling of Split Ring Resonators: A Path to THz Metamaterials with Ultrasharp Resonances," *PRL* 112, 183903, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.183903>
- [9] Hadi Amarloo, Daniel M. Hailu, and Safieddin Safavi-Naeini, "Multiple Fano Resonances Structure for Terahertz Applications," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 50, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.2528/PIERL14100203>
- [10] Ranjan Singh, Ibraheem A. I. Al-Naib, Martin Koch, and Weili Zhang, "Sharp Fano resonances in THz metamaterials," *OPTICS EXPRESS* 6312, 28, vol. 19, no. 7, Mar. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.006312>
- [11] Ndubuisi E. J. Omaghali, Volodymyr Tkachenko, Antonello Andreone, Giancarlo Abbate, "Optical Sensing Using Dark Mode Excitation in an Asymmetric Dimer Metamaterial," *Sensors*, 14, pp. 272-282, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s14010027>
- [12] Ranjan Singh, Ibraheem A. I. Al-Naib, Yiping Yang, Dibakar Roy Chowdhury, Wei Cao, Carsten Rockstuhl, Tsuneyuki Ozaki, Roberto Morandotti, and Weili Zhang, "Observing metamaterial induced transparency in individual Fano resonators with broken symmetry," *APPLIED PHYSICS LETTERS* 99, 201107, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3659494>

- [13] Wei Cao, Ranjan Singh, Ibraheem A. I Al-Naib, Mingxia He, Antoinette J. Taylor, and Weili Zhang, "Low-loss ultra-high-Q dark mode plasmonic Fano metamaterials," *OPTICS LETTERS* / Vol. 37, No. 16 / August 15, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OL.37.003366>
- [14] Ibraheem Al-Naib, Yuping Yang, Marc M. Dignam, Weili Zhang, and Ranjan Singh, "Ultra-high Q even eigenmode resonance in terahertz metamaterials," *APPLIED PHYSICS LETTERS* 106, 011102, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4905478>
- [15] Yu Yuan, Christopher Bingham, Talmage Tyler, Sabarni Palit, Thomas H. Hand, Willie J. Padilla, Nan Marie Jokerst, and Steven A. Cummer, "A dual-resonant terahertz metamaterial based on single-particle electric-field-coupled resonators," *APPLIED PHYSICS LETTERS* 93, 191110, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3026171>
- [16] Christian Jansen, Ibraheem A. I. Al-Naib, Norman Born, and Martin Kochl, "Terahertz metasurfaces with high Q-factors," *APPLIED PHYSICS LETTERS* 98, 051109, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3553193>
- [17] Shengyan Yang, Zhe Liu, Xiaoxiang Xia, Yiwen E, Chengchun Tang, Yujin Wang, Junjie Li, Li Wang, and Changzhi Gu, "Excitation of ultrasharp trapped-mode resonances in mirror-symmetric metamaterials," *PHYSICAL REVIEW B* 93, 235407, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.93.235407>
- [18] Ranjan Singh, Wei Cao, Ibraheem Al-Naib, Longqing Cong, Withawat Withayachumnankul, and Weili Zhang, "Ultrasensitive THz sensing with high-Q Fano resonances in metasurfaces," *Appl. Phys. Lett.* 105, 171101, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4895595>

류 한 철(Han-Cheol Ryu)**[정회원]**

- 2000년 2월 : 한양대학교 전자·전자통신·전파공학과(공학부)
- 2002년 2월 : 포항공과대학교 전자·전자통신·전파공학과(공학석사)
- 2011년 2월 : 한국과학기술원 정보통신공학과(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2013년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 삼육대학교 카메카트로닉스학과, 융합과학과 조교수

<관심분야>

전자공학, 전자파, 정보통신

박 대 준(Dae-Jun Park)**[준회원]**

- 2016년 2월 : 삼육대학교 카메카트로닉스학과(공학학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 삼육대학교 일반대학원 융합과학과

<관심분야>

전자공학, 전자파