메타물질 개요와 파동에너지 극한제어 연구단 소개

DOI: 10.3938/PhiT.24.017

박남규·이학주

Introduction to Metamaterials and the Global Frontier Program for Extreme Wave Control

Namkyoo PARK and Hakjoo LEE

The general outcome of wave propagation is ultimately determined by the properties of the medium, through which the wave travels. If extreme manipulation of wave propagation is to be achieved, an unusual space of wave parameters, including regions not offered by natural materials, needs to be accessed. A wide variety of artificial, extreme wave parameters and their applications have been witnessed for different types of waves and material systems under the name of metamaterials. In this article, we expand the fundamental physics of metamaterials and address their current technical bottlenecks and future outlooks. Finally, we will summarize the goals and the strategies of the Center for Advanced Meta-Materials (Camm), which started from 2014 and is funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning as a Global Frontier Project.

메타물질 기술

1. 기술의 개요

메타물질(metamaterial)은, 폭 넓게는 Wikipedia에 서술된

저자약력

박남규 교수는 1996년 Caltech 응용물리학과에서 박사학위를 받았고, Bell 연구소와 삼성전자를 거쳐 현재 서울대학교 전기정보공학부에서 교수로 재직 중이다. 현재 나노광학 관련 연구를 수행하고 있으며, 특히 로직소자, plasmonic 소자와 메타물질관련 연구에 집중하고 있다. (nkpark@gmail.com)

이학주 단장은 현재 한국기계연구원 나노역학연구실 책임연구원, UST 나노메카트로닉스와 겸임교수, 파동에너지극한제어연구단 단장으로 재직하고 있다. 2003년에 KAIST 자동차 및 설계공학과에서 박사학위를 받았으며, 나노공정/측정에 기반한 파동에너지 극한제어 및 융합기술 개발에 관한 연구를 수행하고 있다. (hjlee@kimm.re.kr)

Fig. 1. Analogy between the natural atom and meta atom.

대로 ‘자연계에 존재하지 않는 물성을 가지는 가공된 인공적 물질’을 이야기한다. 다른 정의로서는, ‘물질’ A와 B가 구조적으로 섞여서 나타나는 ‘복합물질’의 ‘유효물성’이 물성 A와 B의 단순 합으로 나타나지 않을 때를 이르기도 한다. 따라서 위와 같은 넓은 정의를 사용하는 경우에는 합금, 광결정 등과 같은 잘 알려진 물질도 메타물질의 범주에 포함될 수 있다고 할 수 있다.

그러나 일반적으로 메타물질의 정의는 이보다는 조금 더 정교한데, 이 경우 메타물질은 ‘메타원자’(meta-atom)로 구성된 물질을 칭하는 것으로 봄이 타당하다. 이러한 메타원자는 목적에 따라 ‘설계’된 내부구조를 가지며, 그 구조와, 크기, 주기적(periodic), 혹은 준주기적(quasi-periodic) 배열 등에 따라 다양한 유효물성을 발현시키게 된다. 예를 들어 전자기파 메타원자를 설계하고 이를 적절히 배열하면, 통상적으로 얻지 못하는 음(minus)의 굴절률이나 극한(extreme) 굴절률을 얻는 것이 가능해지므로, 이를 통하여 광학적 cloaking, 즉 투명망토의 구현 등이 가능해진다. 참고로, 메타원자의 크기는 파장보다 상당히 작으며($\sim 0.1\lambda$ 정도면 충분), 단순한 굴절률보다는 전자기파의 근본적 물성들(예를 들어 유전율, 투자율)을 제어하기 위해 설계된다.

현재 제일 활발히 연구가 되고 있는 전자기파(Electromagnetic Wave) 물질을 예로 들어 메타원자/물질의 원리를 보다 자세히 설명해 보도록 한다. Maxwell 방정식 안에 들어있는 기본 물리량은 다음과 같다: 파동함수로는 전자기장(electric field) E , 자기장(magnetic field) B ; 전자기장의 source로는

Fig. 2. Oscillation of dipole moment around the resonance frequency.

전하(charge) ρ 와 전류(current) J ; 물질 내에서 전기장과 자기장에 대한 반응을 나타내는 유전율(permittivity) ϵ 과 투자율(permeability) μ .

이때 전자파의 굴절률 n 은 ϵ 과 μ 의 곱에 대한 제곱근 $n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ 형태로 주어지며 매질 내에서의 빛의 속도와 제반 전파(propagation) 성질을 결정하게 된다. 진공에서 ϵ 과 μ 값은 각각 1로서 굴절률 값 $n=1$ 을 주지만, 물질 내부에서의 ϵ 과 μ 값은 1과는 다른 값들을 가지게 되는데, 이 원리는 간단한 모델로 설명이 가능하다. 그림 2는 단진동 원자 model상에서, 외부전기장과 자기장에 대한 전자의 반응을 보여준다. 외부에서 주파수 ω 의 전기장이 원자에 인가되면, 전자는 평형 위치에서 벗어나서 흔들리게 되며, 이때 전자질량과 원자의 유효 용수철상수로 결정되는 공명주파수인 ω_{res} 부근에서 전자파는 흡수되거나, 혹은 위상차를 겪게 된다. 이는 잘 알려져 있는 단진동(simple harmonic oscillator)의 공명 흡수/위상 스펙트럼과 동일한 모양을 가지게 되는데, 주목할 점은, 이때 인가된 driving force 주파수 ω 와 ω_{res} 의 상대적 위치에 따라서 out-of-phase motion 또한 가능해진다는 점이다. 즉, 이를 정리하면, 전기장 E 에 대한 전자의 반응 $P(=\epsilon \cdot E)$ 는 E 의 주파수와 원자의 공명주파수 사이의 관계에 따라서 결정되게 되며, 이때 전자파에 대한 전자/원자반응(물성)의 비례상수인 ϵ 은 원자의 구조나, 입사되는 전자파의 주파수에 따라서 다른 값을 가질 수 있게 됨을 의미한다.

따라서 메타물질의 관점에서는 적절한 전기적, 또는 자기적 공명구조를 설계하여 메타물질의 작동(operation) 주파수에서 우리가 원하는 ϵ 과 μ 값, 그리고 $n = \sqrt{\epsilon \cdot \mu}$ 값 등을 얻어내는 것이 최종 목표라고 하겠다. 메타원자의 기본구조로는, ϵ 값의 조절을 위한 금속 나노선(metal wire)과, Pendry가 제안한, μ 조절을 위한 금속 환형 공진기(ring resonator) 구조가 대표적이라고 할 수 있다. 이를 함께 배치하면, 음의 굴절률 ($n < 0$)을 구현하는 것도 가능해진다. 한편으로, 목적에 따라, 그리

고 공정조건 등에 따라서 보다 다양한 형태의 메타물질과 응용사례가 계속해서 발표되고 있다. 또한, 이상에서 기술적 원리의 해설을 위해 예시한 전자파 메타물질 외에도, 최근에는 음향파, 초음파, 탄성파, 지진파, 그리고 복사열과 등에 대해 메타물질 연구가 확산되어 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 메타물질의 설계와 구현은 전자공학, 물리학, 광학, 음향학, 전자기학, 고체이론, 안테나공학, 재료, 나노가공, 또한 병렬연산을 통한 대규모의 수치해석에 이르는 융합적 지식과 협업을 필요로 하는 경우가 많다.

더불어, 그 기초 원리에 있어서 자연계에 존재하지 않았던 인공적인 물성을 메타원자를 사용하여 구현하는 것이므로, 응용에 있어서도 폭넓은 분야에 걸쳐서 현재까지 존재하지 않았던 독특한 기술들을 가능하게 하여준다. 음(-)의 유전율, 투자율, 음(-)의 밀도, 탄성률, 영(0)굴절률과 고굴절 메타물질 등을 이용하여, 군사적 목적을 위한 스텔스 기술, 방재 목적을 위한 지진파 차단기술에서부터, 통신 응용의 전자파 차단이나, 생체용 초고해상도 센서, 초음파 안전진단, 고성능 차음기술, 초박막 광학렌즈, 광대역 태양전지 응용 등이 연구되고 있다.

2. 기술적 난제

모든 파괴적 신기술이 그러하듯이, 메타물질의 실질적인 응용에 있어서도 현재 해결하여야 하는 난제들이 존재한다. 1990년대 말, John Pendry 교수에 의해 이론이 정리되기 시작하여 2015년 현재 10년이 조금 넘는 비교적 짧은 역사를 생각할 때에, 향후 해결이 가능하리라 여겨지지만 아직 뚜렷한 해결책이 나오지 않은 기술적인 문제들은, 중요도에 관계없이 다음과 같다.

1. 대역폭(Operation bandwidth): 메타물질은 원리에서 기술한 바와 같이 공진기(Resonator) 구조를 채용하는 경우가 많은데, 이는 공명대역(Resonance bandwidth) 부근에서만 메타물질의 물성이 특화될 수 있음을 말한다. 이를 극복하기 위한 방안으로는, 서로 다른 공명주파수를 갖는 공진기들을 함께 사용하거나, 비공명(Non-resonant) 구조의 메타원자를 사용하는 기술 등이 연구되고 있다.

2. 손실(Loss): 전자파 메타물질의 재료로서 주로 사용되는 금속을 한 예로서 들면, Ohmic loss에 의한 전자파의 손실은 메타원자의 공명특성을 열화시킬 뿐만 아니라, 설계된 메타물질에 손실을 수반한다. 이를 극복하기 위한 방안으로서, 금속보다 손실이 작은 highly doped semiconductor와 같은 물질을 개발/사용하거나, 손실이 작은 유전체 기반의 메타원자를 설계하는 기술들이 최근에 이르러 연구되고 있다.

3. 설계(Design): 지금까지의 메타물질 설계방식은 거의 대

부분 trial-error/retro-fit 방식으로 이루어지고 있다. 예로서 전자파메타물질의 경우, 금속체 내부에서의 전하(charge) 움직임을 파악하는 것이 비교적 용이하므로, 직관을 사용해 후보구조를 도출한 뒤 반복된 수치해석/실험을 통해 원하는 물성이 나올 때까지 세부구조를 변경하는 방식이 주로 쓰인다. 그러나 이런 방식은, 통합된 시각에서의 top-down 설계가 불가능하고, 따라서 실현 가능한 물성의 영역을 원리적으로 파악 및 구현하기가 힘들다는 단점이 있다. Full-/semi-analytic한 방식으로 목표물성(예를 들어 전자파 메타물질의 ϵ 과 μ , 음향 메타물질의 ρ 와 B)값을 주는 메타원자의 내부구조를 도출해내는 것은, 메타물질의 자유로운 구현에 있어서 중요한 과제이다.

4. 가공(Fabrication): 비록 한 방향에 대한 특이물성을 가지는 메타물질로도 구현할 수 있는 응용범위는 매우 넓지만, 등방성(isotropic)을 가지는 메타물질을 구현하는 것은 그 응용을 더욱 확장시켜준다. 따라서 3차원구조의 메타물질, 더불어서 파장이 작은 가시광($<1\ \mu\text{m}$) 영역의 메타원자에 사용되는 수십 nm 크기의 구조체를 원하는 모양대로 가공하는 것은 현재의 나노공정 기술에 있어서도 쉽지 않은 일이다. 이를 위하여 대면적 공정기술과 더불어서 더 높은 해상도의 구조물 가공기술이 개발되어야 한다. 최근에 이르러서는 자가조립 방식의 조립기술이나 nano-imprint 방식의 기술들이 시도되고 있다.

3. 기술적 실현시기

앞에서 서술한 기술적 난제들을 극복한다면, 완벽한 메타물질의 구현이 가능할 것이다. 그러나 현 상태에서도 파장이 긴 파동(음파, 마이크로파, THz파)들을 취급하여 구조체가 쉽게 만들어질 수 있는 메타물질분야, 또한 매질의 손실이 크게 중요하지 않은 응용분야(흡수재 및 차단재, 파동집속 기술 등)에서는 기술적인 실현이 어렵지 않다. 이러한 분야는 빠른 시일 내에 응용기술들이 선을 보일 것으로 생각된다.

한편으로, 파장이 상대적으로 짧아서 나노구조체를 사용해야 하고 더불어 금속손실도 극복해야 하는, 가장 난이도 높은 가시광대역 메타물질의 완벽한 구현 시기는 나노공정의 개발진도와 긴밀한 관계를 가진다고 말할 수 있다. 그러나 Moore의 법칙에 따라 반도체가공 선폭이 줄어드는 추세를 고려하면, 가시광 대역 메타물질 분야에서도 향후 십년을 전후한 시기에 매우 유망한 성과가 보일 것이 예측된다. 참고로 가공선폭과 관련하여, 현재 상태에서도 보다 진보된 He-ion 등을 이용한 FIB(Focused Ion Beam)이나 ALD(Atomic Layer Deposition) 기술 등을 사용하면, 1 nm급의 해상도(resolution)를 갖는 구조물들을 실험실수준에서 가공하는 것이 가능하다. 이러한 기술들에 근거해서 다양한 응용기술들이 파생되고 더불어 산업화가 이루어질 것으로 판단된다.

4. 산업적 실현시기

메타물질의 응용분야가 폭넓고, 경우에 따라서 특수한 목적을 가지고 사용될 것이 예상되기 때문에, 산업화의 난제는 각개의 기술별로 상이할 것으로 판단된다. 대규모생산이 필요하지 않으며 원가나 수요에 민감하지 않은 특수한 응용 분야와, 구조체가 큰 메타물질의 경우는 (마이크로파 협대역 흡수체 등) 수년 이내에도 산업화가 가능할 것이나, 대량 생산과 나노구조 기술이 필요한 경우에는 (예를 들어 광대역 태양전지를 위한 완전흡수, 전도성 메타물질) 실험실 수준을 벗어난 대면적, 저가 가공기술의 구현과, 사용가능한 원천 소재의 공급, 대체재 (예로서 화석연료) 존재 여부 및 가격 등에 따라서 산업화 여부와 그 시기가 영향을 받으리라 생각된다. 파장이 긴 통신대역 안테나는 이미 2009년 Netgear, Rayspan, LG 등에 의해 일부 상용화되어 사용되고 있으며, 메타물질 안테나를 개발하는 Kymeta라는 회사는 빌 게이츠 등의 투자를 받기도 하였다.

5. 응용가능분야

응용분야의 구분은 물성(전자파, 음파 등)에 따른 분류와, 적용기술(IT, BT 등)에 따른 분류가 가능하다. 우선 물성에 무관하게 적용될 수 있는 대표적 응용기술을 살펴보고, 이후 물성에 따른 응용분야와 마지막으로 적용기술에 따라서 정리해 보기로 한다.

1) 투명망토(Cloaking, Stealth): 언론과 일반인의 많은 관심을 받고, 군사적 응용 등으로도 주목을 받는 기술이 Invisible cloaking 기술이다. 메타물질의 유효 굴절률을 조정하여 전자파/음파 등이 가리고 싶은 물건 주위의 메타물질을 따라 전파해 나가도록 하면, 관찰자는 숨겨진 물체가 없는 듯 느끼게 된다. 이 기술은 Radar, Sonar, Cell phone, 무선 인터넷, 열상 카메라 야간투시경 등에 대한 Stealth 기술로서 적용 가능하다. 최근에 이르러서는 Quasi-orthogonal 좌표변환 이론에 근거한 carpet cloaking을 통하여 보다 넓은 대역폭에 대하여 비교적 작은 굴절률 변화만으로도 투명망토 기술을 구현하는 것이 가능하게 되었다.

2) 완전 흡수체(Perfect absorber): 빛이나 음파, 복사열(Thermal radiation)을 완전히 흡수하는 기술은 기존물질로도 가능하나, 메타물질은 극한 물성에 근거한 초소형화와 효율성, 그리고 흡수대역 가변/확장성에 있어 비교될 수 없는 장점을 지닌다. 예를 들어서 센서, 변조기, 위장기술, 무선통신, 파도/지진방파제, 그리고 특히 광대역 완전흡수체를 이용한 박막태양전지 등에 응용이 가능하다.

3) 수퍼 렌즈(Super lens, Perfect lens): 현재 존재하는 모

든 렌즈와 현미경은 그 해상도에 있어서 Abbe의 파장 한계를 넘기지 못하고 있다. 이러한 문제는 예를 들어 반도체 가공이나, 세포내 기관 내부구조/움직임 등을 연구하는 데에 한계점으로 작용한다. 그러나 메타물질을 사용한 수퍼렌즈는 자연계에 존재하지 않는 초고굴절 렌즈나, 음굴절 Hyper 렌즈 등을 통해 현미경으로 잡히지 않는 물체 주변의 근접장(Near field)을 볼 수 있도록 해주어, Abbe 한계점을 극복할 수 있도록 하여준다. 예를 들어 2005년에 발표된, silver film을 사용한 수퍼렌즈는 40 nm의 분해능으로 Abbe 한계를 거의 10배가량 극복할 수 있음을 보여주었다. 비슷한 원리로, 메타물질을 이용한 파동의 초 고집속이 가능하다. 이는 전자기장 집속이 필요한 분자 센서나, 비선형공학 등에 응용이 가능하다.

4) 파면제어(Wavefront Control): 메타원자가 공진기(resonator, antenna)라는 점을 생각하면, phase antenna array 등의 개념을 사용하여 임의의 파동제어가 가능하다. 메타원자의 공진특성을 활용하여 기존 안테나대비 매우 작은 구조와 더불어, 일반적으로 불가능한 특성/응용을 얻어낼 수 있다. 예를 들어 일반적 안테나와 달리, 진공과 완벽한 impedance matching이 되는 안테나, 전자파 차폐를 통해 채널간섭을 없앤 MIMO 안테나, 위성통신용 초소형 안테나, GPS, 지하 탐사 안테나, 무선 에너지 전달 등이 가능하다. 마이크로파 안테나 기술은 파동의 전파속도나 위상을 자유롭게 제어할 수 있는 장점 등으로 주목받아 가장 먼저 상용화가 이루어지고 있다.

5) 전자파 응용가능분야: 전자파 스펙트럼 내에 존재하는 가시광, IR(Infrared), THz, Microwave 영역별로 약간씩 다른 응용기술이 가능하다. 가시광 영역($0.4 \sim 1 \mu\text{m}$)에서는, 앞에서 기술한 수퍼렌즈를 활용한 생물/화학적 센서 및 반도체 식각기술, 또한 광학대역에서 자연계 물질성이 약한 Chirality나 비선형성을 증가시킨 자성메타물질이나 광학스위치, 완전흡수체를 이용한 박막태양전지 등이 가능할 것이다. IR 영역($1 \sim 100 \mu\text{m}$)에서는 열복사파(Thermal radiation) 제어가 현재 중요한 응용 분야이다. THz($100 \sim 1,000 \text{ mm}$) 기술이 활용되는 분자센서나, 이를 활용한 보안, 바이오, 제약분야에 적용이 가능하며, 현재 개발이 미진한 THz파 제어소자, 예로서 THz파 증폭기 등이 연구되고 있다. 마이크로파 영역은 앞 절에서 기술한 분야에의 응용이 가능하다.

6) 물질파 응용가능분야: 음파(Acoustic Wave), 초음파(Ultrasonic wave), 탄성파(Elastic wave), 파도(Ocean wave), 지진파(Seismic wave) 등 물질파에서의 메타물질 응용연구도 활발하다. 음파에서의 물성은 Bulk modulus B 와 Mass density ρ 로 정의된다. 특히 B 와 ρ 는 2차원 전자과시스템에서의 ϵ 과 μ 에 대응되며, 음파굴절률 $n = \sqrt{\rho \cdot B}$ 로 결정되어 설계기법에 있어서 유사성을 지니나, 전파에 있어서 매질이 필요

Fig. 3. Tunable metamaterial with MEMS structure.

하고 파장 최소길이가 매질의 lattice constant에 의해 제약된다는 점이 다르다. $B < 0$ 인 경우 매질은 압력이 가해졌을 때 팽창하며, $\rho < 0$ 인 경우 매질은 힘이 작용하는 방향과 반대 방향으로 움직이게 된다. 이런 특성들을 이용하여서 비침습적 의료영상기, 무반사 음향원, 공연장 음파차폐/증강, 가구/차량용 방음재, Sonar cloak에의 응용이 가능하다. 더불어 Phonon에 의한 열전달을 제어하는 기술, Pentamode MM을 이용한 meta-fluid의 구현도 가능하다. 파장과 에너지가 매우 큰 파도나 지진파에 대한 차폐기술과 투명망토기술도 개발되고 있다.

6. 미래의 연구방향

미래의 연구방향은 크게 두 가지로 나누어, 현재의 기술적 문제해결/회피방법과 메타물질관련 새로운 기술개발이 될 것이다. 이 중에서 기술적 난제/해결방법은 앞에서 다루었으므로, 최신연구방향과 미래의 기술방향에 집중해서 기술해 보도록 한다.

1) 기능성 메타물질: 메타원자의 격자구조나 위치, 배경(background) 물질 등을 바꾸어서, 혹은 비선형(nonlinear) 물질이나 Parity-Time symmetric한 구조를 사용하면, 메타물질의 특성을 시간이나 방향에 따라서, 혹은 파동의 handedness(chirality)에 따라 조절하는 것이 가능해진다. 예로서 Graphene에서 voltage gating 등을 이용하여 금속/유전체 특성을 조절하는 것이 가능하며, 또한 MEMS를 사용해 메타원자들의 배열을 조절하거나, 전/자장, 액정 등도 배경물질 특성 조절에 활용될 수 있다. 또한 최근 chiral 메타 물질을 기반으로 하여 파동에 방향성을 부여하는 광학적 위상 절연체 특성도 활발히 연구되고 있다. 이러한 기능은, 간단하게는 스위칭, 필터에의 적용뿐만이 아니라, 더불어 하나의 플랫폼에서 응용목적에 따른 적응형 필드제어를 가능하게 하므로 메타물질의 대역폭 한계를 회피/해결할 수 있게 하는 좋은 방안이기도 하다. 이러한 가변형 기술은 또한 시간에 따른 변형된 Radar 반사파를 되돌려 주는데 사용되어 군사적 위장(Camouflage)용으로 사용될 수도 있다.

2) 저차원 메타물질(Low-dimension Metamaterial): 최근 Harvard의 Capasso 교수에 의해서 제안/시연된 2차원 메타표면은 저차원 메타물질의 대표적 예로, 현재 주목을 받고 있

Fig. 4. Hierarchy and Goals of the Global Frontier metamaterial project.

는 2차원 신소재 Graphene과 매우 잘 융합되는 기술이다. 또한 좌표축방향에 따라서 메타물성이 달라지는 Hyperbolic 메타물질 역시, 물질의 Density of State가 무한하다는 사실로 인하여 최근 들어 많은 관심을 끌고 있다.

3) 복합기능 메타물질(Composite function Metamaterial): 메타물질의 원리에서 기술한 바처럼, 메타원자의 크기는 파장보다 상당히 작으며 $\sim 0.1\lambda$ 정도면 충분하다. 각 메타물질 적용 분야(가시광, THz, GHz, Microwave, 음파, 탄성파, 복사파)에서 취급되는 파장이 상이하므로, multi-scale 구조를 적용하면, 여러 계층의 메타물성을 가지는 복합기능 메타물질을 설계하는 것이 가능하다.

위에 정리한 기술들(기능성 메타물질, 저차원 메타물질, 복합기능 메타물질) 외에도 메타물질의 새로운 응용분야에 대한 개척과 더불어서, 더 나은 공정기술, 예를 들어 자기조립기술 등의 확보를 통한 산업화예의 준비는 꾸준히 지속되어야 할 것임이 자명하다.

파동 에너지 극한제어 연구단

1. 연구단 개요와 사업 목표

파동에너지 극한제어 연구단은 글로벌 프런티어 사업의 10 번째 연구단으로서 한국기계연구원 내에 위치하고 있다. 본 사업은 2014년 9월에 시작되었으며, 3단계 연구기간 9년 동안 매년 약 100~130억 원의 연구비가 미래창조과학부를 통하여 지원된다. 사업단은 총 3개의 핵심 연구과제 산하의 14개의 세부과제로 구성되며, 총 101명의 박사, 교수급 연구원과 대학원생 198명이 연구에 참여하고 있다. 본 연구단의 목표는 극

Fig. 5. Scientific and Technical significance of metamaterial systems.

한물성시스템 이론정립과 제조, 측정, 평가 플랫폼을 구축하여 파동과 매질의 상호작용을 극한 제어하는 극한물성시스템을 구현하고, 기계, ICT, 에너지, 바이오/의료 융합화를 통한 실용화로 6T(NT, IT, ET, BT, CT, ST) 신산업을 창출하는 것이다.

이러한 목표를 위해 내부의 연구조직은 극한물성시스템 플랫폼기술(대면적 제조 및 측정, 6T 응용기술) 개발에 집중하는 출연연구원 중심의 제 1 핵심과제, 그리고 파동의 특성에 따라 특화된 원천기술을 개발하는 전자기 파동에너지 제어기술의 제 2 핵심, 역학 파동에너지 제어기술의 제 3 핵심과제로 구성되어 있다. 핵심과제 및 세부과제 수행을 위해 7개의 출연연(KIMM, ETRI, NNFC, KIMS, KIER, KRISS, KIST)과 15개의 대학(서울대, KAIST, 연세대, 고려대, 이화여대, 아주대, 경북대, UNIST, 서울시립대, 한양대, 숭실대, GIST, 전남대, 세종대, DGIST)이 참여하고 있으며, 2014년 기준으로 최근 5년간 연구단 참여 연구원의 전체 실적은 SCI 논문 1,440편(NSC 38편 포함), 특허등록 국내 539 건, 국외 112건, 기술이전 46 건, 기술료 36억 원이다.

2. 연구단 사업 범위와 전략

극한물성시스템이란, 기존의 물질이나 소재가 제공하지 못하는 극한물성(간단한 예로 음굴절률, 음의 밀도 등)을 구현하기 위해 사용되는 합성, 나노, 가공기술에 기반한 창조적 개념의 소재 및 이의 응용소재, 시스템을 총칭한다. 본 연구단에서 개발될 극한물성 시스템은 파동에너지지를 극한까지 제어할 수 있는 원천기술로서, 전자기파와 초음파 등의 파동을 다루는 현존하는 다양한 시장에 파급력을 지니고 있다.

극한물성시스템 기반의 파동 제어 기술은 그 중요도로 인해 전 세계적으로 큰 주목을 받고 있으며 다수의 연구 그룹이 연구력을 집중하여 기술선점을 위해 노력하고 있는 분야이다. 2003년, Science지에서 과학발전의 10대 기술 중 하나로 소개되었으며, 이어 2010년에는 '21세기 중대 과학적 성취 10'

에 극한물성시스템을 물리학 부분의 최대 연구성과로 선정한 바 있다. 이외에도 MIT Technology Review (2007)는 ‘10대 유망 미래기술’로 해당 기술을 선정한 바 있다. 파급효과에 있어서는 현재 129억 달러의 시장을 지니고 있는 초음파 진단 시장, 20억 달러의 시장을 지니고 있는 방진 소재 시장, 360억 달러의 무선통신 및 전자소자 시장, 390억 달러의 조명 및 태양전지 시장, 154억 달러의 의료용 이미징 시장 등에서 극한물성시스템을 이용한 지속적 시장 성장과 신제품의 창출이 가능할 것으로 전망되며, 2022년에는 1,554억 달러 규모의 연관시장이 형성될 것으로 전망되고 있다. (출처: Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices (IDTechEx, 2009), Metamaterials: Technologies and Global Markets (BCC Research, 2012), Ultrasonics: Global markets and technology (BCC Research, 2008))

이러한 기술적 변화에 대응하기 위하여 본 연구사업은 국가 과학기술의 토대를 다지고 미래 성장동력을 확보하기 위한 기초연구부터 응용연구까지를 포함한다. 극한물성 시스템의 이론 정립부터 실용화를 위한 응용기술 개발까지 전주기 연구를 체

계적으로 수행하고자 산학연의 최고 연구진을 구성하여 원천기술 확보(1단계, 2년) → 실용화 플랫폼 구축(2단계, 3년) → 실용화 촉진(3단계, 4년)을 통한 산업지향 원천기술 및 실용화기술 개발을 수행한다. 특히, 전 세계적으로 극한물성시스템에 대한 연구는 주로 극한물성시스템의 기초연구에 집중되어 있으며, 전자기와 역학 파동 모두에 대해 원천부터 응용과 제조까지를 모두 아우르는 광범위한 연구 그룹은 아직 전무하다는 사실에 주목하여, 본 사업단은 전자기 및 역학 극한물성 시스템을 포함하는 통합극한물성 시스템 핵심기술개발과, 실용화를 위한 3차원 공정, 대면적화, 광대역, 저손실, 다기능 구현 기술 및 이를 위한 다학제간 융합연구 수행 등을 통해 선진연구기관과 차별화를 모색한다. 무엇보다도, 지금까지 산발적으로 진행되어왔던 이종 학제간 (전자과, 역학과, 공정) 파동에너지 제어분야의 우수한 연구자들을 대거 참여시킴으로써, 전 세계적으로도 일례를 찾아볼 수 없는, 이론정립부터 모델링, 해석, 설계, 제조, 측정, 평가에 대한 통합적인 플랫폼 기술을 제공하고 이를 통해 미래사회의 핵심 소재가 될 극한물성시스템 기술에 대해 국제적으로 선도적인 입지를 구축할 것이다.