

생체의료 및 보안분야 응용을 위한 테라헤르츠 기술

Terahertz Wave Technologies for Biomedical and Security Application

IT 융합 · 부품 기술 특집

목 차

-
- I. 서론
 - II. 테라헤르츠파 기술의 특징
 - III. 생체의료분야 응용
 - IV. 보안검색분야 응용
 - V. 결론

백문철 (M.C. Paek)	테라헤르츠연구팀 책임연구원
곽민환 (M.H. Kwak)	테라헤르츠연구팀 선임연구원
전동석 (D.S. Jun)	테라헤르츠연구팀 책임연구원
김성일 (S.I. Kim)	테라헤르츠연구팀 선임연구원
강승범 (S.B. Kang)	테라헤르츠연구팀 선임연구원
류한철 (H.C. Ryu)	테라헤르츠연구팀 선임연구원
김기출 (K.C. Kim)	테라헤르츠연구팀 선임연구원
유병화 (B.H. Ryu)	테라헤르츠연구팀 연구원
강광용 (K.Y. Kang)	테라헤르츠연구팀 팀장

생체의료 및 보안검색 응용을 위한 테라헤르츠파 기술에 대하여 조사하였다. 테라헤르츠파는 기존의 X-선이나 초음파, 적외선, 밀리미터파 등에 비하여 독특한 특성을 가지고 있어 새로운 분광 및 영상기술을 확립할 가능성을 가지고 있다. 테라헤르츠 기술의 발전과 더불어 생체의료분야에서는 암진단, 치과질환 및 바이오칩 등에서 큰 시장을 형성할 것으로 전망되며, 보안검색분야는 공항, 항만, 지하철, 우편물 취급 등의 공공부문에서부터 군사목적에 이르기까지 응용이 가능하다. 최근 수 년 동안 소형, 경량 및 저가격의 테라헤르츠 시스템이 개발되면서 시장전망이 크게 높아졌다. 초기에는 공공시설 및 대형 병원에서 시작하여, 기술적 안정성 및 시장 활성화에 의한 경제성이 확보되면 민간 부문의 시장으로 크게 파급될 것으로 기대된다.

I. 서론

1990년경에 처음으로 논문에 발표되면서 학계로부터 큰 관심을 끌기 시작한 이후 현재에 이르기까지, 테라헤르츠파(Terahertz wave; 10^{12} Hz) 기술은 미래의 첨단기술로서 많은 기대를 이끌어왔고 현재도 계속 진행중이다[1]-[4]. 대기 중에 존재하는 수분에 의하여 흡수가 심하다는 특성 때문에 쉽게 검출이 되지 않아 오랜 동안 미개발 주파수 영역으로 알려져 왔지만, 실제로는 대기권을 벗어난 우주공간에서는 Big Bang 이후 수백억 년 동안 90% 이상의 정보가 테라헤르츠 대역으로 이루어져 있다.

전자공학 및 광공학 분야의 기술발전으로 테라헤르츠 주파수 대역의 전자기파를 발생시키고 검출하는 기술이 개발되면서, 이 미개척의 주파수자원에 대한 활발한 연구개발이 진행되었다. 테라헤르츠파는 적외선과 밀리미터파의 중간, 즉 전파와 광파 사이에 위치하면서 독특한 분광특성과 투과성을 가지는 것으로 알려지고 이를 기초로 하여 다양한 응용분야가 기대되었다. 그러나 초기의 기대와 전망과는 달리 테라헤르츠파의 발생출력, 영상획득 속도, 극저온 요구 및 고가의 주변 기기장치 등 세부적인 기술 한계와 제약조건에 의해 2007년 초까지 그 응용성과 상용화에 대한 비판론과 낙관론이 공존하여 왔다. 그 이후 2007년 하반기에 소형, 경량화한 저가격의 테라헤르츠 시스템이 등장하고 상품화되면서 다시 새로운 국면을 맞이하게 되었다. 소형/고성능의 테라헤르츠파 시스템의 개발과 함께 이를 이용한 응용기술의 개발이 활기를 띠게 되었다.

테라헤르츠파의 발생 및 검출장치, 그리고 집적된 시스템 기술 등과 같은 하드웨어의 개발과 함께 여러 응용분야에 대한 활용방법의 개발이 동시에 진행되고 있으며 상황에 따라서는 새로운 응용기술이 창출될

수도 있을 것이다. 현재까지는 생체의료분야와 보안 감시분야에 대한 시장전망이 가장 큰 것으로 알려져 있으며 이에 대한 예측도 다양하다. 정보사회를 지나 스마트 사회, 그 이후의 미래 사회에서는 어떤 기술을 요구하게 될지 정확한 예측은 어려우나, 생체의료와 보안검색은 인간의 생명을 다루고 안전한 사회를 위하여 반드시 필요한 분야이므로 테라헤르츠파와 같은 미래형 첨단기술이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

본 고에서는 현재의 기술수준을 기반으로 하여 생체의료와 보안검색분야에 접근하고 있는 테라헤르츠파 기술의 응용에 대하여 기술적, 산업적, 경제적 및 사회적 측면에서 고찰하고 문제점 및 해결방안 등에 대하여 논의하였다.

II. 테라헤르츠파 기술의 특징

테라헤르츠파의 주파수 범위에 대해서는 아직 정확한 정의는 없다. 다만 관점에 따라 차이는 있으나 대체로 밀리미터파와 적외선 사이에 해당하는 것으로 인식되고 있다. 최근 IEEE 표준에 상정하기 위한 논의의 결과로서 정리된 자료에 의하면 하한선을 0.1 또는 0.3THz로 설정한 바에 대해 논란이 있었는데, 대부분의 생체 소재 및 고체 소재가 0.1~5THz 범위에서 고유의 지문 스펙트럼(fingerprint spectrum)을 가지는 것으로 알려짐에 따라 분광학적 측면에서는 최소한 0.1THz까지는 포함해야 한다는 입장이 강조되었다[5]. 그리고 상한선을 보면 10THz 및 30THz까지의 두 가지 안이 있으나, 10THz 이상이 되면 적외선 분광의 영역에 해당되고 이미 그에 적합한 광원과 검출기, 그리고 분석기술도 모두 확보되어 있는 상황이다. 이에 따라 테라헤르츠 주파수 하한선은 0.1THz, 상한선은 10THz로 결정하는 안이 대세로 되어 왔다. 그런데 최근 테라헤르츠 통신용 주파수

로서 응용을 고려하면 밀리미터파의 주파수 대역을 일반적으로 30~300GHz, 즉 0.3THz까지로 고려하므로, 테라헤르츠파의 하한선을 0.3THz로 보는 것이 합당하다는 주장도 설득력을 가진다. 이 외에도 물리학적 측면에서 볼 때 테라헤르츠파는 전자파(radio)와 광파(light)의 중간에 해당하는데, 이는 전자공학 기술과 양자역학적 기술의 경계에 해당하며 곧 열 에너지와 광자 에너지가 정합(match)하는 지점으로 볼 수 있다. 따라서 볼츠만 상수와 절대온도의 곱 $k_B T$ 와 플랑크 상수 h 의 관계로부터 상온에서 $k_B T/h$ 의 값을 계산하면 5.9THz가 된다. 이 값은 이론적으로도 전자파와 광파의 경계선에 해당하며 테라헤르츠파의 중심 주파수라고도 볼 수 있다.

이상의 상황을 종합하여 보면 테라헤르츠파의 범위는 0.3~10THz가 적정 영역인 것으로 판단되며, 시영역 분광(THz-TDS) 기술을 적용할 경우에 한하여 0.1THz까지 하한선을 확대할 수 있을 것으로 생각된다.

테라헤르츠파는 이온화 에너지가 낮아 안전하며, 근적외선에 비하여 Rayleigh 산란이 적어 투과성이 우수하므로 가시광에 불투명한 소재에 대하여 투과 영상을 얻어낼 수가 있다. 비금속(non-metal) 및 비극성(non-polar) 소재에 대해 높은 투과율을 보이며, 고분자 소재에 대해서는 상대적인 반응성이 높다. 이것은 거대 분자의 회전(rotation), 진동(vibration), 전이(transition) 등의 주파수가 테라헤르츠 영역에 해당하기 때문이며, 이 특성을 이용한 분광 및 영상 기술이 활발히 연구되고 있어 상용화를 앞두고 있다.

테라헤르츠파의 주파수 범위는 전자기 스펙트럼에서 넓은 영역에 걸쳐 있으므로 단일 기술로서 모든 주파수를 커버할 수는 없다. 일반적으로 1THz 이하의 낮은 주파수 대역에서는 전자공학(electronics)을 기반으로 하는 기술이, 높은 주파수 대역은 광자공학

(photonics)을 기반으로 하는 기술이 적용된다. 테라헤르츠파 기술은 크게 연속파 및 펄스파로 구분되며, 각 특징에 따라 분광 및 영상 기술로 세분된다. 현재의 테라헤르츠 기술의 개발은 대부분 광원(source), 검출기(detector) 및 다양한 시스템 기술로 집약된다. 광원 기술은 보다 강력한 출력, 보다 넓은 주파수 대역, 보다 견고하고 작으며, 보다 저렴한 가격으로 구현하는 방향으로 개발되고 있으며, 검출기의 경우에는 보다 넓은 주파수 대역과, 보다 높은 동작온도, 보다 우수한 감도(sensitivity), 그리고 집적화 기술 등이 개발대상이다. 시스템 기술에서는 각 구성요소들을 집적화하여 보다 작으면서 이동 및 휴대가 가능하도록 하는 방안이 연구되고 있다. 테라헤르츠 영상을 좁은 영역의 가시거리에서 관찰하고자 하는 경우 내시경(endoscope) 등이 활용되며, 이때에는 도파관(waveguide) 기술이 요구된다.

테라헤르츠파 기술의 응용분야는 매우 다양하며, 거의 모든 산업분야에 적용이 가능하나, 대표적인 분야를 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 식품검사: 수분 함량의 분석을 이용한 변질여부, 오염 및 훼손 등의 검사
- 2) 생체의료: 유방암, 피부암 등의 진단, 내시경을 이용한 의료진단, 마약검사, 유전자검사
- 3) 보안 및 군사: 은닉된 무기, 화약, 생물학 무기의 검사, 모래폭풍에서의 시야확보, 공항에서의 승객 및 수하물 검사, 우편물 내부의 위험물질, 서적 내에 감추어진 무기검사
- 4) 기타 과학: 환경 오염물질검사, 원격 지구탐사, 플라즈마 진단, 암석 내부의 화석 및 원유탐사

테라헤르츠 기술의 시장 개황은 세계적으로 볼 때 초기전망에 비하여 투자자들의 기대에 미치지 못하였던 것이 사실이다. 즉, 테라헤르츠 기술의 기능과

능력이 입증되어 실제로 응용되기도 전에 지나친 홍보가 진행되어 온 점이 있었으며, 직접 연구개발을 하고 있는 업체에서도 시장에 대한 준비와 대책이 소홀했었다는 지적도 많았다. 실제로 2007년 상반기까지도 테라헤르츠 기술개발에 난제가 산적해 있었으며 시장에 대한 전망도 불투명했었다. 그러나 이와 같은 우려와 비판론은 2007년 하반기에 접어들면서 급변하였다. 작은 크기에 견고하면서도 저렴한 가격의 테라헤르츠 시스템이 시장에 등장한 것이다. 그동안에는 조심스러운 전망과 회의론적인 시각이 공존하였지만, 최근 들어 이러한 의견은 거의 사라지고 있으며 향후 테라헤르츠 산업이 거대시장을 형성할지의 여부에 대해서는 의심의 여지가 없는 것으로 알려져 있다.

현 시점에서, 수많은 분야에서 응용기술이 개발되고 있으며 주요 이슈는 어느 분야에서 가장 큰 시장이 형성될 것인가에 초점이 모아지고 있다. 이에 대한 해답은 1) 응용분야의 다양성, 2) 시장의 개발, 3) 고객의 인식도, 4) 기술에 대한 교육 및 이해도, 그리고 5) 기술의 혁신 등과 같은 요소들에 의하여 결정될 것이다.

결론적으로, 테라헤르츠 기술의 산업화 성공을 위해서는 하드웨어의 개발도 중요하지만 응용 분야의 개발과 함께 고객에 대한 교육을 통하여 인식을 확산시키는 것이 반드시 필요하다.

III. 생체의료분야 응용

생체의료는 인간의 건강과 삶에 직접적으로 연관이 되어 있기 때문에 테라헤르츠 기술개발의 초기부터 가장 많은 관심과 기대를 받아왔고, 현재도 논란이 계속 진행중에 있는 분야이다. 큰 틀에서 보면 향후 거대한 시장이 형성될 것으로 판단하는 그룹과 테라헤르츠파의 여러 가지 제약적인 기능 때문에 비판적

으로 전망하는 그룹으로 구분된다. 그러나 이러한 논란은 2010년 영국 런던의 한 병원에서 시행된 테라헤르츠 영상기술의 시범적 운영으로 인해 낙관론 방향으로 기울어지고 있는 추세이다. 그리고 다른 기술로는 불가능하며 테라헤르츠파만이 보유하고 있는 독특한 특징으로 인하여 새로운 기술 및 시장의 가능성에 기대를 갖게 하고 있다.

암을 진단하는 고유의 특성, 붕대로 감은 상처의 상황을 비파괴적으로 검사할 수 있는 기능, 치아에 대한 3차원 영상기능 등이 그 예이며 특히 X-선에 비하여 매우 안전하다는 것이 가장 큰 장점이다[6],[7]. 테라헤르츠파의 영상기술을 발전시켜 테라헤르츠 현미경 기술도 개발될 가능성이 있다.

테라헤르츠 대역에서는 단백질과 DNA를 포함하는 많은 생물분자들이 공명 주파수를 가지며, 이로 인해 테라헤르츠 지문 스펙트럼을 나타낸다[8],[9]. 이 특성을 이용하면 생체분자에 대한 모니터링 및 조작이 가능하다. 이 부분에 대해서도 아직 찬반론이 있으나 상업적 의도에 의해 왜곡된 정보를 제외하고 객관적으로 판단할 경우, 낙관론적인 방향으로 기울어지고 있다.

의료분야만 보면, 테라헤르츠 분광보다는 영상기술이 유망할 것으로 전망되고 있다. 수분에 쉽게 흡수되는 특성으로 인하여 테라헤르츠파는 인체의 표피 부분에서 수 mm 이상을 침투하지 못하므로 피부의 종양이나, 절개된 부분의 노출부위에 대한 영상만을 얻어낼 수 있다. 그러나 육안으로 관찰할 수 없는 테라헤르츠파만의 독특한 영상을 제공하므로 그 응용범위와 능력은 크게 주목받고 있다. 초음파 영상의 경우 인체 조직을 투과한 영상과 특정 경계면에서 반사한 영상을 합성하여 새로운 초음파 영상을 얻어내기도 하는데, 이와 같은 원리를 테라헤르츠파 영상기술에 적용하면 전혀 새로운 테라헤르츠 의료영상을 창출할 수 있을 것으로 전망된다.

1. 의료분야 응용의 기본적인 특성

의료분야 응용에서는 테라헤르츠파 영상 기술의 약점으로 되어 있는 영상획득 시간 및 극저온 장치 부착 등의 조건이 비교적 완화된다. 이것은 의료분야 응용의 시장 가능성을 높여주는 요인이 된다. 그러나 인체 조직에 존재하는 수분으로 인해 테라헤르츠파의 침투깊이가 최대 수 mm 이내로 한정되므로 X-선과 같은 투과영상을 얻기가 매우 어렵다. 이론적으로는 출력을 크게 증가시킨다 해도 투과영상은 불가능한 것으로 알려져 있다. 침투깊이도 조직에 따라 다르지만 지방은 지방성분이 많아 다른 조직에 비해 깊이 침투할 수 있으며 210GHz 대역을 사용할 경우 수 cm에 이른다고 한다. 그러나 이와 같은 단점도 테라헤르츠 내시경을 사용하면 해결할 수 있다. 상피세포암, 식도암, 전립선암 등은 내시경을 투입할 경우 표면관찰이 가능하므로 암세포와 정상세포의 구분, 완치된 부위와 치유중인 부위를 비파괴적으로 진단하는 것이 가능할 전망이다. 이러한 내시경이 구성되기 위해서는 테라헤르츠파의 도파관 기술이 요구된다.

테라헤르츠 시연역 분광기술(TDS)은 생체분자, 내복약, 암세포 단백질, 박테리아 및 DNA 등의 거동과 구성상태를 분석할 수 있다[10]. 테라헤르츠파 분광이 적외선 분광과 구별되는 점은 분자간 진동을 직접 측정한다는 것으로써 거대 분자의 동역학(dynamics)을 규명할 수 있다는 점이다. 이 특성을 이용할 경우 생체 의료분야에서의 응용범위는 더욱 확대될 수 있으며 새로운 기술산업 및 시장도 창출될 것으로 전망된다.

2. 암세포의 진단

테라헤르츠파의 인체 침투깊이가 평균 수 mm에 지나지 않는 단점이 있으나 실제로 85% 정도의 암은 상피 부분에 존재한다고 한다. 그러므로 매우 작은 테

라헤르츠 내시경이 개발되면 인체 내부에 발병한 암의 진단도 가능할 것이다[11],[12].

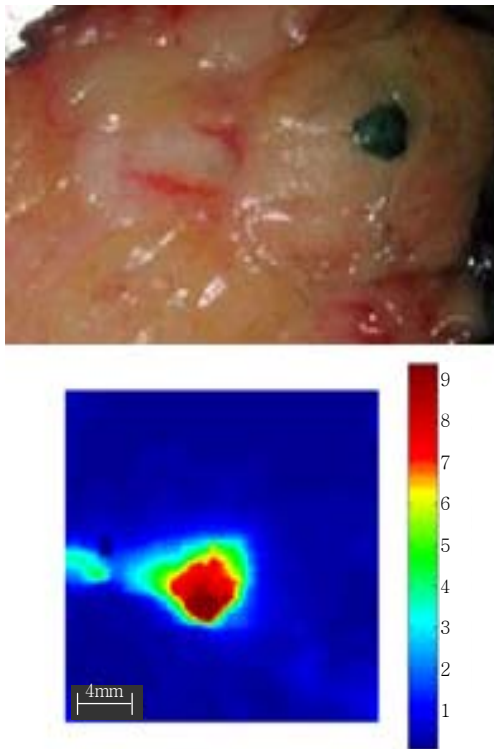
테라헤르츠파의 흡수정도는 생체 조직의 특성에 따라 다른데 이를 이용하여 암세포를 구분하는 것이 기본적인 개념이다. 따라서 인체에 대한 전신 테라헤르츠파 스캔을 수 분 내에 할 수 있게 되면 향후 거대한 수요가 발생할 것이다. 이를 위해서는 1) 관련된 기술의 확보, 2) 과학적인 입증 및 규명, 그리고 3) 수요자의 인식확대 등이 풀어야 할 핵심 이슈이다.

의료영상 기술의 새로운 응용방법으로서 암 수술 도중에 절개된 부위에 대한 테라헤르츠 영상을 이용하는 기술도 가능하다. 테라헤르츠파 영상의 강점은 암세포와 정상세포의 구분능력이므로 수술 도중에 번거로운 조직검사 없이 영상을 이용하여 암세포를 정확히 구분한다면 매우 유용한 기능이 될 것이다. 수술 과정에서 암세포의 범위를 결정하는 것은 매우 중요하며 상당한 전문기술이 요구되는 어려운 작업이다. 육안으로 관찰할 때에는 암세포가 약간 붉은 색으로 보인다고 하는데 인간의 눈은 단면관찰에는 유리하지만 표면관찰은 쉽지 않다는 특성이 있다. 현재는 숙련된 외과 의사의 경험이 필요하며, 실제로는 조직학(histology)을 이용한다. 즉, 수술 시에 절개부위에 대한 조직검사와 절개수술을 반복하면서 암발병 부위를 제거하고 있다. 이러한 상황에서 테라헤르츠 연속파 영상기술을 적용한다면 많은 시간을 절감하고 암진단 및 수술효율을 높일 수 있을 것이다. (그림 1)은 피부암 발생부위를 가시광과 테라헤르츠 영상으로 비교한 것이다. 육안으로 구분이 어려운 암세포 부위에 대하여 테라헤르츠 영상을 이용하면 뚜렷하게 구분할 수 있음을 볼 수 있다.

2010년에 영국 런던의 Guy's Hospital에서는 유방암 수술 과정에서 TeraView사의 테라헤르츠 영상 시스템을 가동하면서 수술을 성공적으로 수행한 사

례가 보고된 바 있다. 이 테라헤르츠 영상시스템을 이동식으로 초소형화할 경우 실시간 검사도 가능할 것이며, 도파관 기술이 진전되면 앞에서 언급한 테라헤르츠 내시경 기술도 가능할 전망이다.

그러나 현재 의료분야에서 테라헤르츠 기술의 시장은 거의 형성되어 있지 않다. 그 이유는 테라헤르츠 영상시스템의 높은 가격 때문인데, 의료계의 입장에서는 새로운 고가의 시스템을 활용하여 모험하기 보다는 현재의 시스템을 저비용으로 고수하는 것이 유리하다고 판단하기 때문이라는 분석이다. 하지만 실제로 테라헤르츠파의 암진단 실험에 참여한 경험이 있는 의료 종사자들은 테라헤르츠 시스템의 도입에 대해 낙관적으로 판단하고 있다고 한다. 2010년 피부암 진단을 위한 테라헤르츠 영상기술만의 시장은 세계적으로 5천만 달러 정도일 것으로 예상된다[13].

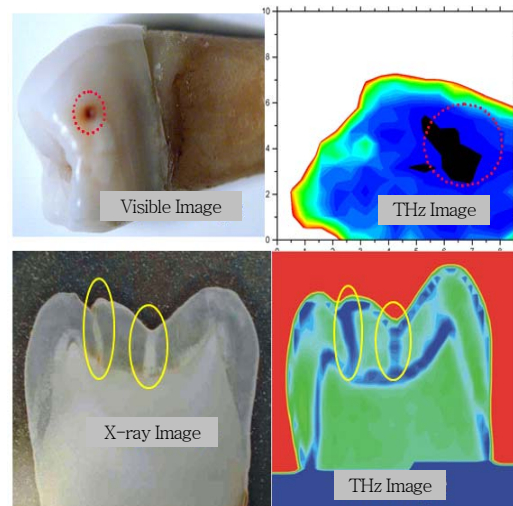


(그림 1) 인체 피부암에 대한 가시광 영상과 테라헤르츠 영상의 비교

3. 치과질환 응용

인체조직 중에서 수분을 포함하지 않는 부위 중의 하나가 치아이다. 치아는 단단하고, 충분한 두께가 있으며, 쉽게 움직이지 않아 진단이 유리한 장점이 있다. 테라헤르츠파는 치과질환에서 충치로 인한 내부 공동(cavity), 표면 에나멜 층의 손상 등을 진단하는데 활용도가 높을 것으로 전망된다.

테라헤르츠파의 치과질환 응용은 1999년 영상을 이용한 연구로부터 시작되어 현재 수준까지 이르고 있다. 치아의 공동 크기가 20~30 μ m 이상이 되면 내부에는 부패물질과 박테리아로 가득차게 되어 테라헤르츠파의 산란특성이 현저히 변화하므로 영상으로 확연히 구분할 수 있다. 이것은 X-선 영상과 다른 기능이며 방사선에 의한 피폭 위험도 없다. (그림 2)는 이것을 설명하는 것으로써 가시광 및 X-선 영상과 테라헤르츠 영상을 비교한 것이다. 육안으로는 표면에 작은 구멍만이 관찰되나, 치아 내부의 공동에 대한 크기와 형태를 X-선과 테라헤르츠 영상으로 관찰한 것을 비교한 것이다.



(그림 2) 충치에 의한 공동을 가시광, X-선 및 테라헤르츠 영상으로 비교 관찰한 것

테라헤르츠 영상의 문제점은 치아를 둘러싸고 있는 잇몸이나 구강 내의 수분에 의한 흡수이다. 그러므로 더욱 효과적인 영상을 얻기 위해서는 이동식 소형의 시스템이 필요하며 구강 내에 넣어서 영상을 획득할 수 있도록 하는 기술도 요구된다.

하지만 현 시점에서는 이보다 더 큰 문제는 역시 가격이다. 테라헤르츠 영상 시스템을 저가격으로 구성하는 것이 필요하다. 실제적으로 치과의사들은 아직도 X-선 영상에 익숙하며 저가격으로 쉽게 영상을 얻어낼 수 있는 장치를 선호한다. 또한 암치료와 달리 치과질환은 생명과 직결되는 문제가 아니기 때문에 병원에서도 지나친 고가의 장치를 원하지 않는 실정이다. 그러므로 기술적인 혁신으로 가격과 성능을 획기적으로 개선시키지 않으면 현시점에서 거대 시장을 형성하기는 당분간 어려울 것으로 보고 있다.

4. 바이오센서와 바이오칩

바이오센서 및 바이오칩은 생체의료의 테라헤르츠파 응용에서 가장 기대가 되는 분야로서 기술적인 개선과 함께 거대한 시장을 형성할 가능성이 큰 부분이다. 기본적으로 테라헤르츠 기술을 이용하면 여러 가지 형태의 다른 생체분자를 구분할 수 있으므로 이 기능을 활용하면 생체의 이상 유무 진단, 임상실험, 마약성분의 검출, 생체방어 시스템 검색 등 수많은 적용이 가능하다.

바이오센서는 생물학적인 특성을 분석하기 위하여 생물시료와 물리화학적 센서가 결합한 소자를 지칭하는 의미로 사용된다. 광을 이용한 바이오센서는 일반적으로 표면 플라즈몬(surface plasmon)에 의한 에바네스цент파(Evanescent wave)를 사용하며, 단백질과 효소의 유전자변형을 이용하여 특정 시료를 분석하기도 하고 제약분야에서 마약의 발견 등에 활

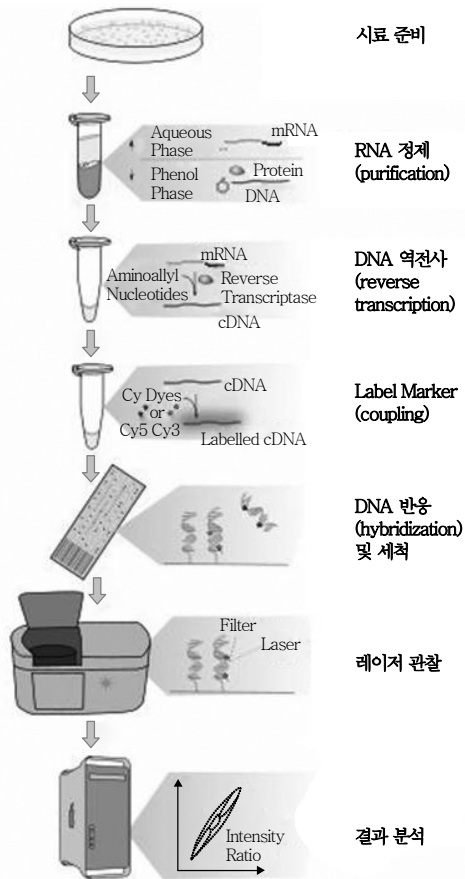
용되기도 한다. 전기화학적(electrochemical) 바이오센서는 전자를 생성하거나 소비하는 효소 촉매(enzymatic catalysis) 반응을 기본으로 한다. 그리고, 압전방식(piezoelectric) 바이오센서는 전위가 변화할 때의 센서 결정체의 기계적인 탄성변형을 감지하는 원리를 이용한다. 생물시료가 센서 결정체에 접촉하였을 때 진동주파수가 변화하는 것을 감지하여 시료의 분석을 한다. 이와 같은 바이오센서는 반도체 정밀기술과 결합하여 미세유체(microfluid)를 분석하고 미세 어레이(microarray) 형태의 대량 고속분석 기술로 진화하였다. 이것은 칩 형태로 초미세화하여 바이오칩으로 개발되었고 칩 위의 실험실로 알려져 있는 랩 온어칩(LOC) 기술로 연계되었으며 DNA의 분석에 사용된다.

DNA는 이중 나선구조로 되어 있으면서 수소결합을 기본으로 하므로 분자간의 진동, 비틀림, 회전 등의 진동수가 테라헤르츠 주파수 영역에 해당한다. 이 수소결합에 변이가 생기면 테라헤르츠 스펙트럼을 이용하여 펨토몰(10^{-15}) 수준의 극미량도 검출할 수 있다. 테라헤르츠 바이오칩 기술은 현재 사용되고 있는 일반적인 기술에 테라헤르츠파를 적용하여 기능을 개선하는 개념이다[14].

바이오칩은 분광기에 광원 및 검출기를 집적한 구성으로 되어 있으며, $N \times N$ 개의 포켓 어레이 시편에 대하여 각각의 포켓에 들어있는 극미량 시료의 분자 정보를 규명하는 작업이다. DNA 미세 어레이는 여러 가지 형태로 진행되고 있으나 기본적인 과정은 다음과 같다.

- 1) 기준 시료(reference sample; DNA, RNA, 단백질 등)를 위치한다(RNA 정제). 이때의 기판은 실리콘 웨이퍼, 슬라이드 유리판 등으로 구성되며 각 포켓은 MEMS로 제작한 전자소자와

- 연결하기도 한다.
- 2) 시료의 표면에 테스트용 시료(혈액 등)를 cDNA 역전사(complementary DNA reverse transcription) 시킨다.
 - 3) 형광체 염료(일반적으로 녹색 및 적색 형광체를 사용)를 각 시료에 착색한 후에 세척한다.
 - 4) 기준 시료와 테스트 시료가 미세 어레이로 구획이 정해진 기관위에서 DNA 반응(hybridization)을 하게 되면, 형광체가 잔류하게 되고 이를 레이저로 관찰한다.
 - 5) N×N 어레이에서의 형광체 발광강도와 위치로부터 테스트 시료의 DNA 특성을 분석한다.

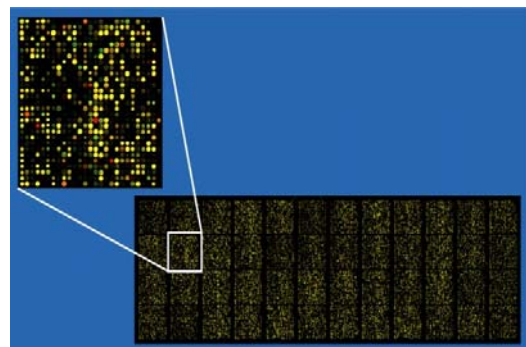


(그림 3) 일반적인 DNA 미세 어레이 실험과정에 대한 설명 개념도

(그림 3)은 이러한 과정을 설명하기 위한 것이며 실제로는 많은 세부과정이 생략되었다. (그림 4)는 (그림 3)의 과정을 거쳐 나타난 실험결과로서 40,000 개의 포켓을 가진 미세 어레이의 사례이다.

그런데 이 과정의 진행 도중에는 형광체와 시료 간에 화학적인 반응도 일어나게 되며 이로 인한 오류를 일으키기도 한다. 그리고 형광체의 수명 및 발광능력이 제한적이므로 시간적인 제약을 받게 된다. 그러므로 형광체를 사용하지 않는 라벨-프리(label free) 방법을 필요로 하며 실제로 이러한 요구가 많은 실정이다[15],[16].

테라헤르츠파를 이용할 경우 이에 대한 하나의 해결책을 제시할 수 있다. 먼저 형광체 마커가 불필요하며, DNA 복제에 의해 나선구조가 완성이 되면 직접 테라헤르츠파의 공명에 의해 검출이 가능하게 되므로 사전처리가 필요없게 된다. 무엇보다도 전체 공정이 간편해지고 화학적 처리가 없어지므로 분석결과의 오류가 크게 낮아지면서 on/off의 형태로 결과를 도출할 수 있다. 그리고 어떠한 형태의 DNA에 대해서도 적용이 가능하므로 박테리아, 단백질, 생체 및 인체에 직접적으로 활용할 수 있다. 형광체를 필요로 하지 않는 방법은 이외에도 플라즈마 공명 및 화학발광법 등을 사용하는 방법이 있으며, 테라헤르츠파 바



(그림 4) DNA 미세 어레이의 실험결과로서 모두 40,000개의 포켓으로 구성되어 있으며 일부분의 확대사진을 첨부하였다.

이오칩 기술은 그 중의 한 가지에 해당한다[17].

바이오칩 시스템의 소형화도 하나의 과제이다. 특히 군사용으로 사용할 경우 전장과 가까운 곳에서 숙련된 인원이 질량분석기 등의 장치를 갖추고 운영할 수 있는 시스템으로서 BIDS 등이 있다.

생화학 분야에서는 DNA 보다 분자의 구조에 대한 정보를 더 필요로 한다. 특히 유전자공학은 단백질의 구조보다는 수분의 함량, 특히 수분에 용해되어 있는 물질의 특성에 더 큰 관심을 가진다. 이 경우에도 테라헤르츠파는 유용하게 사용될 수 있다. 수분에 강한 흡수를 보이는 성질은 시료의 크기, 즉 미세 어레이에서 개별 포켓의 크기를 더욱 작게 만들게 되면 해결할 수 있다. 테라헤르츠파에 간섭을 일으키는 수분의 양을 무시할 수 있는 만큼 미세화하는 방향의 연구가 진행중에 있다.

생체분자들이 테라헤르츠파에 민감한 특성을 이용하여 DNA를 기반으로 하는 고감도의 생물 분석장치도 가능하다. 이른바 “smart dust”로 불리는 것으로서 독성물질의 검출 및 관련 과정을 분자수준의 정밀도로 제어할 수 있는 기술이다. 최근에는 유전자 돌연변이에 대한 테라헤르츠파 연구가 시작되었다.

5. 생체의료 시장의 전망

생체의료분야의 시장을 형성하는 데에 장애물들은 크게 다음의 3가지로 집약할 수 있다.

- 1) 테라헤르츠파와 생체분자 사이의 상호 반응에 대한 메커니즘이 아직도 충분히 규명되지 않았다. 이는 정확도와 신뢰도 구축에 장애가 되는 요소이며, 수 년 후 규명이 되더라도 이미 분석의 효율성이 저하한 이후가 될 수도 있다.
- 2) 테라헤르츠파 연구자와 의료업계 종사자 간의 연계가 약하다. 일반적으로 보수적인 사고방식의

의료업계는 새로운 도전에 따른 위험을 감수하기 보다는 기존의 방법을 개선하고자 하는 성향이 강하다.

- 3) 가장 중요한 문제로, 시스템의 가격이 매우 높다는 것이다. 티타늄 사파이어 펄스 레이저의 경우 수억 원에 달하여 초기 시장형성이 어려운 점이 문제이다. 그러나 최근 저가격의 펄스 레이저 시스템이 상품화하고 있어 매우 희망적인 부분이다.

생체의료분야의 시장성은 먼저 테라헤르츠파 영상이 인체의 피부에 국한된다는 인식에서 벗어나야 한다. 내시경을 이용하거나 수술시 절개면에 대한 영상 확보 기술이 필요하다. 그리고 수분에 대한 흡수 문제는 시료의 처리과정에서 해결해야 한다.

시장의 규모에 대해서는 아직도 많은 논쟁이 있지만 계속 확대할 것이라는 데에는 이견이 없다. 유럽에서 진행된 TeraVision 프로그램에서는 테라헤르츠파 기술을 이용하여 여러 가지 세포들의 형태와 특성을 쉽게 구별하는 가능성을 발견하였다. 특히 기존의 영상기술과 화학적 분석기능을 결합하여 새로운 기술 시장이 가능한 것으로 알려져 있다. 의료진단 이외에도 세포, DNA 및 분자구조에 대한 연구와 응용이 큰 시장을 형성할 수도 있다. 예를 들어 세포막을 뚫고 바이러스가 침입한 경우 테라헤르츠파 영역에서 특성 진동주파수를 보이며 이것은 영상으로도 확인이 된다. 그러므로 이러한 연구개발을 통하여 바이오칩 분야가 가장 큰 시장을 형성할 가능성이 있다. 2009년 현재 전세계적으로 400개 이상의 업체와 160개 이상의 연구기관에서 바이오칩 기술을 연구하고 있으며 마약의 발견, 유전공학에 기반을 둔 진단학 등을 대상으로 하고 있다. 이 중의 일부가 테라헤르츠파 기반의 바이오칩 기술이 될 것이다. 2009년 바이오칩 시장은 30억 달러, 2015년에는 60억 달러로 예측된다.

<표 1> 테라헤르츠 생체의료 시장의 전망

구분(M\$)	2015년		2020년	
	Min.	Max.	Min.	Max.
의료영상	26.6	58.1	56.0	242.0
바이오칩	11.6	25.2	16.2	46.4
총계	31.4	68.4	72.7	288.4

<자료>: Terahertz Systems, Thintri Market Study 2010.

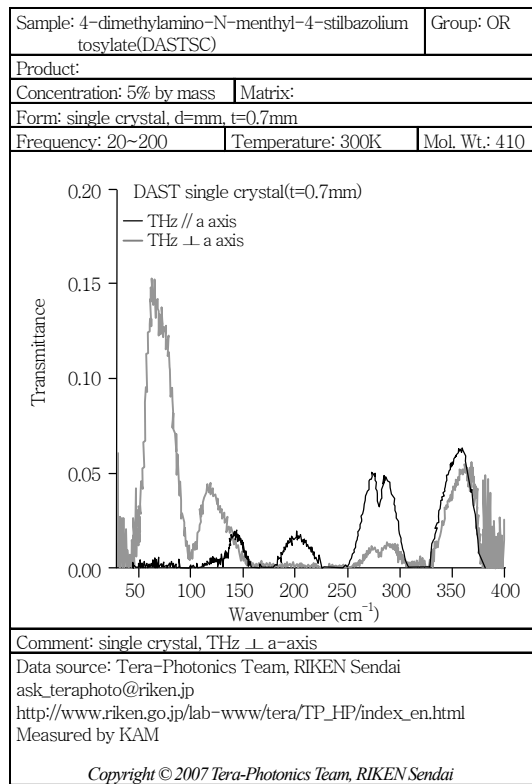
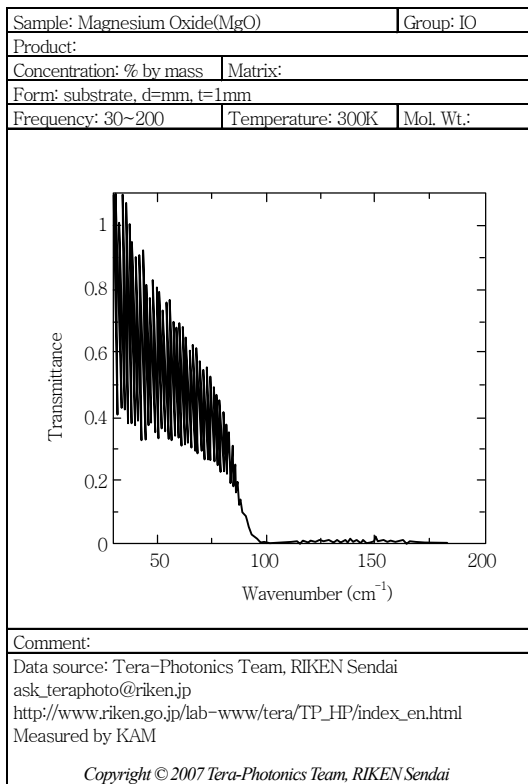
<표 1>은 생체의료 분야에 응용되는 테라헤르츠 기술의 시장을 예측한 것이다[13].

IV. 보안검색분야 응용

테라헤르츠파 기술이 개발되면서 보안검색분야는 가장 큰 가능성을 가진 응용분야 중의 하나로 인식되었다. 그것은 화약이나 마약 등 위험물질의 대부분이

테라헤르츠파 주파수 영역에서 고유의 지문 스펙트럼을 가지므로 테라헤르츠 시영역 분광에 의하여 쉽게 규명될 수 있기 때문이며, 무기류 등은 비파괴 보안영상을 이용해 검색할 수 있기 때문이다. 현재로는 큰 시장이 형성되어 있지 않지만 많은 연구자들은 머지않은 미래에 민간, 군사 등의 여러 영역에 걸쳐 거대한 시장이 열릴 것으로 기대하고 있다[18].

(그림 5)는 일본 이화학연구소(RIKEN)에서 확보한 500여 종의 테라헤르츠 분광 데이터베이스의 예로써 기관 소재로 많이 쓰이는 MgO와 테라헤르츠파 발생용으로 사용되는 DAST(4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium-tosylate) 소재에 대한 지문 스펙트럼을 나타낸 것이다[19]. 이와 같은 데이터는 이미 수백 종의 물질에 대하여 확보되어 있으며



(그림 5) MgO 기판소재와 DAST에 대한 테라헤르츠 분광 데이터베이스 스펙트럼[19]

세계적으로도 연구개발 기관끼리의 네트워크를 통하여 연구결과와 함께 상호 공유하는 분위기가 확산되고 있다.

2009년 크리스마스에 미국에서 비행기의 테러 미수 사건이 발생한 바 있는데 암스테르담 발 디트로이트 행 여객기에서 괴한이 승객 사이에 숨기고 잠입한 화학물질을 이용해 폭발물을 제조하려던 것으로 밝혀졌다. 이 사건 이후 미국에서는 국내의 모든 비행기 뿐만 아니라 선박, 철도의 승객에 대해 전수검사를 실시할 것을 검토하고 있다. 이러한 추세는 기술의 발전에 의하여 더욱 가속될 전망이다. 이 부분에서 테라헤르츠파를 이용한 보안검색 기술은 큰 역할을 할 것으로 기대된다. 실제 보안영상분야에서는 현재 사용중인 주파수 대역이 300GHz 이하의 밀리미터파에서 1THz 부근의 테라헤르츠파로 이동하고 있다.

보안검색 응용기술의 시장은 공항이나 항만, 우체국 등에서 여객 및 수하물 등을 검색하는 공공시설물과 군사용 위험물의 검색분야로 이루어질 것으로 보인다. 초기에 이와 같은 공공분야에서 안정적인 기술과 경제성이 확보되면 개인이나 민간 부문까지 시장이 확대될 수도 있을 것이다. 각 분야별로 볼 때에 기술적으로는 근본적으로 동일하나, 검색 대상의 특징 및 검색 환경 등에서 차이를 가진다. 여기에서는 이러한 특징적 차이에 대하여 세부적으로 살펴보기로 한다.

1. 공항 및 항만검색

공항, 항만 및 철도 등 공공시설에서는 승객 및 수하물에 바코드 등의 장치를 부착하여 검색하는 것과 특수한 부스(booth) 안에서 투시영상을 검색하는 것이 대부분이다. 미국은 9.11 테러 이후에 항공기 승객 전원에게 대한 검사가 시행되고 있는데 이미 기존의 검색장치는 포화상태이며 보다 빠르고 정확한 정보

를 얻어낼 수 있는 새로운 검색기술을 개발하고 있는 중이다. 국내에서도 이러한 추세를 따라 인천공항에서 전신 투시영상 검색장치가 2010년 10월부터 운영될 예정이며 개인의 프라이버시 문제 등의 논란이 있기는 하지만 머지않아 모든 공항이나 항만 등으로 확대될 전망이다.

공항에서 사용되는 검색장비는 금속탐지를 위해 자기력계(magnetometer)와 X-선 감지기가 사용되고, 폭발물, 마약 등을 위해서는 CT, X-선 회절기, 양자공명 장치(QR) 등이 사용되고 있다. 승객의 검색용 영상장치로는 저조도 후방산란(LDB) X-선과 300GHz 이하의 능동 및 수동형 밀리미터파가 사용된다. 폭발물 감지를 위한 화학분석 기법으로는 기체 크로마토그래피(GC), 화학발광 검출(CLD), 이온 이동도 분광기(IMS), 이온포획 이동도 분광기(ITMS) 등이 사용된다. 특히 이동중인 폭발물의 감지가 가장 어려운 것으로 알려져 있는데 이것은 감지속도가 느리고, 감지율이 낮으며, 여러 가지 기법에 의한 결과가 불일치하고 가격이 비싼 문제 등이 있기 때문이다. LDB X-선은 승객뿐만 아니라 금속, 폭발물 및 플라스틱을 감지할 수 있으나 속도가 늦고, 대상물의 형태가 복잡하면 감지가 어려워지는 문제가 있다. 또한 승객의 검색 시에 개인 프라이버시 문제가 발생할 수 있는 여지가 있다. 이러한 문제는 100~300GHz 대역의 밀리미터파 경우도 마찬가지이다.

특히 화물형태로 운반되는 승객의 수하물은 운반되는 물질의 형태와 함께 성분에 대한 분석도 필요하게 된다. 현재의 수하물은 화학센서와 X-선 검색을 실시하고는 있으나 일부 제한적으로 이루어지고 있는 실정이다. 그러나 향후 보안분야의 시장이 커지고 필요성이 증대되면 수하물 중에 포함되어 있는 폭발물 및 화약과 마약을 동시에 검색할 수 있는 기능이 요구된다. 폭발물을 검색할 경우 전수검사는 현재로

서 불가능하며, 속도문제가 해결되어야 한다. 이를 위해서는 새로운 검출기가 필요하며 이 문제가 해결되면 공항, 항만 이외에도 지하철, 버스 등의 대량 교통 수단과 우편국, 대규모 공개행사장, 길거리 보안 등에도 적용가능성이 있다.

공항을 통한 일반 화물은 매년 세계적으로 수백만 톤 이상에 달하는데 검색비용에만 수백억 달러 이상을 소모한다. 이 화물 중에서 약 10% 정도에 대하여 폭발물 검색을 실시하고 있다. 항만은 더욱 심각하여 세계적으로 매일 수십만 개 이상의 컨테이너가 전국의 항구를 통하여 도착하고 있으며, 부산항의 경우는 2010년 상반기에 약 700만 개의 컨테이너를 처리하였다. 이와 같은 화물에 대하여 검사를 하기 위해서는 막대한 예산이 소요되며, 미국의 세관검사 기관인 BCBP에서는 화물의 검사를 위해 매년 1억 달러 이상을 투입하고 있다.

테라헤르츠파를 이용한 화물 검색은 이와 같은 환경에서 매우 유용하게 사용될 수 있으나 아직은 기술적인 문제가 존재한다[20]. 그 중의 하나는 금속 소재로 되어 있는 컨테이너의 내부를 테라헤르츠파가 투과할 수 없는 점인데 이를 해결하기 위해서는 내시경 형식의 소형 이동식 테라헤르츠 감지기를 사용하는 방법 등이 고려될 수 있다. 또는 컨테이너의 설계와 제작 시에 소재와 구조 등에 대한 새로운 표준을 정하는 문제인데 이 경우 가격이 상승하고 변경된 규정에 따르기 위한 번거로움 등에 의하여 컨테이너 제작업체와 사용자의 반대가 예상된다.

2. 우편물 검색

대부분의 우편물 포장재인 종이, 플라스틱 등의 소재는 테라헤르츠파가 쉽게 투과할 수 있으며, 특히 3THz 이하에서는 거의 투명하다고 할 수 있다. 이에

따라 우편물 내부의 물질에 대해 비파괴적인 검색이 가능하며 물질의 형태뿐만 아니라 구성성분을 규명할 수도 있다. 지문 스펙트럼 데이터베이스를 활용하면 단시간 내에 마약이나 위험물질에 대한 확인이 가능하다. 미국의 대형 특급 우편취급 업체인 UPS와 FedEx에서는 이러한 특징을 인식하고 테라헤르츠파 검색장치에 대해 적극적인 검토를 하고 있는 것으로 알려져 있다. 테리의 위험이 커진 미국뿐만 아니라 일본, 유럽 등지에서는 외국으로부터의 우편물을 통한 마약이나 위험 화학물질의 반입이 문제화되고 있어 이에 대한 검색기능을 강화하고 있다. 실제 일본에서는 2007년 일반 우편물을 통하여 마약분말이 반입된 사례가 발견됨에 따라 이를 방지하기 위한 도구로써 테라헤르츠파 기술을 검토한 바 있다. 2009년의 경우 일본의 우편물 취급소에서는 매일 20만 건 정도의 우편봉투를 취급하는데 이 중에 포함된 마약분말을 검색하는 것은 쉬운 일이 아니다. X-선 검사장치는 우편봉투 내에 포함된 금속 등 이물질의 형태를 파악할 수는 있으나 성분을 분석할 수 없으며, 적외선 분광법으로는 봉투 내에 들어있는 물질을 비파괴적으로 분석할 수 없다. 개의 후각을 이용하는 경우에는 경제성 문제도 있지만 밀봉된 봉투에 대해서는 감지가 어려워진다. 테라헤르츠파는 이러한 문제점을 모두 해결할 수 있는 방안을 제시한다. (그림 6)은 일본의 RIKEN에서 시도한 우편물 검색장치에 대한 설명이다. 모든 우편물에 대한 테라헤르츠파 검색은 어려우므로 X-선 검색으로 내부물질의 이상 여부를 먼저 판단하고, 분말이 들어있는 봉투에 대해 테라헤르츠 분광법으로 적용하는 것을 보이고 있다. 즉, 2단계 검색을 이용하여 우편봉투에 대한 비파괴 방법으로 마약이나 화약 등의 위험물질을 검색하는 것이다.

(그림 7)은 이를 이용하여 마약, 설탕 및 각성제 분말을 지문 스펙트럼을 이용하여 구분하고, 테라헤르

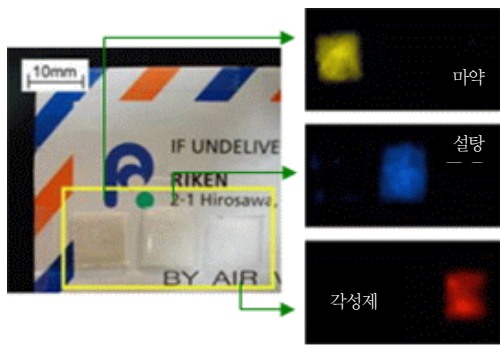


X-ray screening



THz-TDS system

(그림 6) 일본 RIKEN의 2단계 우편물 검색장치. 1차 X-선 검사와 2차 테라헤르츠 검사를 거쳐 위험물을 검색



(그림 7) 우편 봉투 내에 감추어진 마약, 설탕 및 각성제 분말을 테라헤르츠 분광 및 영상기법을 이용하여 비파괴 분석한 사례

츠 영상으로 나타낸 것이다.

본 사례에서와 같이 테라헤르츠 분광을 이용한 물질 확인과 테라헤르츠 영상을 결합하는 기술을 적용하면 새로운 분석결과를 도출할 수 있으며 이를 이용

하면 거대한 시장이 가능할 것으로 판단된다[21].

3. 군사용 검색

군사용으로 사용되는 테라헤르츠 검색기술은 민간용과 개념적으로는 동일하다. 그러나 대부분 실내보다는 실외에서 사용하는 경우가 많을 것이며, 이에 따라 습도 등의 기후조건에 관계없이 사용할 수 있어야 할 것이다. 폭발물의 검출을 위해서는 테라헤르츠와 분광 및 영상기술을 모두 필요로 하며 대부분의 폭발물 데이터베이스는 거의 확보되어 있는 상태이다.

그러나 무엇보다 군사적 목적의 활용을 위해서 가장 큰 장애요인은 원격조정을 위한 것으로써 원거리에서 작동하는 스탠드 오프(stand-off) 방식을 대부분 요구하며, 민간용과는 다른 사양을 갖추어야 한다. 적정거리는 정해진 것은 없으나 전문가들의 의견에 의하면 30~100m 정도를 요구하고 있다. 또한 기후에 따른 영향도 배제할 수 없다.

생물학무기나 화학무기의 경우 이미 다른 기술로 충분히 검색과 보안이 가능하므로 테라헤르츠와의 기능이 특별히 위력을 발휘할 수 있는 부분은 현재로서는 많지 않은 것으로 보이나 향후에 시장성이 기대된다.

4. 보안검색을 위한 기술적인 문제

일반적인 테라헤르츠파 기술에서는 적절한 발생기, 검출기 및 시스템의 집적화가 기본적인 요구사항이다. 보안검색 응용을 위한 기술적인 문제와 그 해결과제는 1) 주파수 대역, 2) 스탠드 오프 및 3) 신뢰도 등을 고려할 수 있다[22],[23].

먼저 주파수 대역에 대하여 살펴보면, 실제 폭발물들의 지문 스펙트럼은 1THz 이상에 존재하며 넓게

는 10~20THz까지 이르고 있다. 그런데 섬유질 소재의 경우 600GHz 이상에서는 투과도가 크게 저하되는 특징이 있다. 이것은 테라헤르츠 연속파를 사용할 경우 문제가 심각해지며 이 경우 고가의 펄스파 시스템을 사용해야 한다. 실제로 저주파수 대역과 고주파수 대역은 상호 보완관계가 있어서, 투과성이 좋을 경우 분광성이 떨어지고, 주파수가 높아지면 영상의 해상도가 증가하는 반면에 투과도가 저하하게 된다. 이러한 관계로부터 상황에 따라 최적의 주파수 대역을 선택하는 것도 검토되어야 한다.

스탠드 오프, 즉 원격 감지 문제는 보안검색용으로 반드시 해결해야 할 과제이기도 하다. 대부분의 보안검색은 피검사자가 인식하지 않은 상태에서 비파괴로 진행되는 것이 최선인데 이 경우 일정한 거리를 두고 검색할 수 있는 기능이 필연적으로 요구된다. 적정거리에 대해서는 많은 의견들이 존재하며 응용분야 및 시장성정도 관련이 있다. 1~10m 정도면 충분한 경우가 있는 반면에, 100m 이상의 장거리를 요구하는 경우도 있다. 이 적정거리는 또한 주파수 대역과도 연관이 있다. 대기 중의 흡수를 고려하면 주파수 대역을 1THz 이하로 하는 것이 좋으나 분광을 위해서는 10~20THz까지도 요구하기 때문이다. 일반적으로 500GHz 대역 부근까지는 10dB 이하의 감쇠범위에서 100m까지 가능한 범위가 존재하며 650GHz, 1.5THz 대역에서도 존재하는 것으로 알려져 있다. 현재까지는 여러 분야 전문가들의 분석에 의하면 테라헤르츠파의 전파(propagation), 감지기능(sensing) 등을 고려할 때 600~800GHz가 적당한 것으로 논의되고 있다.

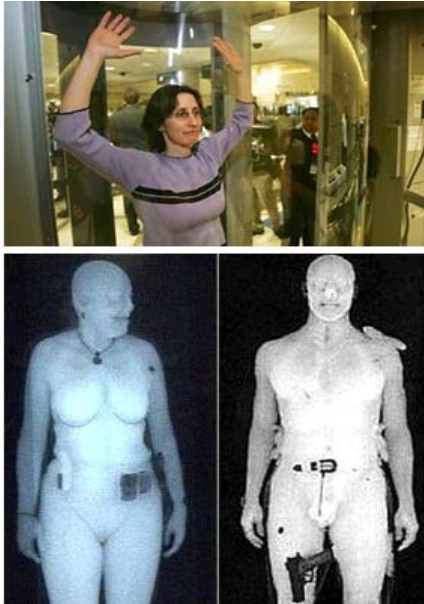
감지거리는 미국의 경우, 최소 30cm에서 최대 400m까지를 범위에 넣고 있으며, 영국의 경우는 최대 100m까지를 고려하고 있다. 그러나 실제로는 주파수 1THz의 경우 100m가 한계일 것으로 보인다.

유효 거리는 더욱 가까워져서 건조한 날씨인 경우라도 30m가 상한선이 될 것으로 보고 있다.

미국 RPI에서는 air plasma 기술을 사용하여 원격 감지거리의 한계를 극복하고자 하는 시도가 있었다. 그러나 이를 위해서는 펄스 레이저를 대기 중에서 강하게 집속하여 플라즈마를 발생시켜야 하므로 기술적인 난제를 해결해야 한다. 영국의 TeraView 사는 1m 거리에서 화약을 정확하게 감지하는 시스템을 개발하여 시연한 바 있으며, Picometrics사는 50m 거리에서 사용할 수 있는 합성 구경(synthetic aperture) 시스템을 개발하였다[24].

신뢰도 문제는 실제적인 상황에서 발생할 수 있는 것으로 검색결과의 정확도 및 재현성 등을 의미한다. 테라헤르츠파는 승객의 의류 중 대부분을 통과하지만 가죽 옷이나 젖은 옷에서는 오류를 일으킬 수 있으며 여러 가지 종류의 옷을 겹쳐 입었을 경우에도 모호한 결과가 나올 수 있다. 실제로 대부분의 의류 소재는 실험실에서와 같이 순수하지 않으며, 여러 물질의 혼합뿐만 아니라 오염물질, 불순물 등이 혼재된 상태이다. 이러한 상황은 폭발물이나 마약의 경우에도 동일하다. 심지어 마약의 경우 다른 액체와 희석시키거나, 금속 소재의 특수 포장지를 사용하는 경우도 있다. 또한 이미 현 시점에서도 논란이 있는 것으로서 전신 투시영상의 경우 개인의 프라이버시에 따른 문제가 발생한다. 이를 위한 해결방안으로 선택적인 검색을 하거나 매우 의심스러운 경우에 경고 사인 등을 통해 미리 알려주는 등의 방법이 논의되고 있다.

(그림 8)은 공항에서 이미 시행중에 있는 전신 투시영상의 예이다. 밀폐된 부스 안에서 피검자는 그림과 같은 형태의 전신 스캔 영상을 제공하게 된다. 금속으로 된 무기, 허리 띠, 금속제 장신구 등도 모두 투시영상으로 확인이 되며 인체의 민감한 부분도 노출이 될 수 있다는 것이 문제가 되고 있다.



(그림 8) 공항에서 사용중인 전신 투시영상장치. 금속제 물품의 형태가 비파괴적으로 확인된다.

5. 보안검색용 검사장치의 요구사항

민간 또는 군사용 보안검색 장치로서 테라헤르츠 장치가 사용되기 위해서 요구되는 사항은 여러 가지가 있으나 먼저 이동성과 소형화가 우선적이다. 승객이나 화물을 검색하기 위하여 거대한 장치로 모두 옮겨와야 한다면 그 유용성이 많이 떨어지게 되기 때문이다. 이를 위한 해결방안은 집적기술(integration)이다. 미국의 Sandia National Lab.에서는 반도체 소자 기술과의 접목을 통한 테라헤르츠 집적기술을 개발 중에 있으며 이는 장기적으로도 시장형성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

다른 요구사항으로는 검색시간의 단축이다. 현재의 펄스파를 이용한 시영역 분광 및 영상기술은 매우 오랜 시간을 요구하므로 이를 해결하는 것이 큰 과제이다. 현 기술수준으로는 검출기를 2차원 배열형태로 하여 실시간에 가까운 속도로 분광 및 영상 정보를 얻어내는 것이 가능하며 이 문제가 원활하게 해결

되면 현재의 검색봉과 같은 형태로 진화할 것으로 생각된다. 이 경우에는 테라헤르츠파의 도파관 기술이 필요하게 될 것이다. 이 외에도 테라헤르츠파 단독보다는 다른 기기와의 장단점을 공유하면서 상호 보완하는 형태가 요구될 것으로 생각된다. 즉, 밀리미터파의 영상기술은 해상도는 떨어지나 실시간의 영상을 얻어낼 수 있으므로, 이를 통해 의심스러운 대상이 나타나면 테라헤르츠 분광기술을 적용하는 방법이 바람직할 것이다. 또한 X-선 영상기술과의 조합도 고려할 수 있다.

이와 같은 여러 가지 요구사항 중에서 가장 중요한 것은 검색효율과 속도, 즉 신속 정확한 기능일 것이며, 그 이후 경제성을 고려해야 할 것이다.

6. 보안검색의 시장성

전 세계적으로 보면 2001년 이후 보안검색 시장이 급격히 증가하고 있다. 우리나라의 경우 통계가 잡혀있지 않으나, 미국은 2010년 현재 국가안전산업 분야가 1,800억 달러, 인체검색 시장은 100억 달러에 이르는 것으로 알려져 있다. 9.11 테러 이후 화학 무기 검색 시장은 2001년도에 미국에서만 1억 2천만 달러이며 이후 현재까지 매년 10%씩 상승하고 있다. 생물학무기의 검색 시장은 2000년 1억 1천만 달러에서 2005년 5억 5천 달러로 성장하였다.

<표 2>는 세계 보안검색 시장을 나타낸 것으로

<표 2> 테라헤르츠 보안검색 시장의 전망

구분(M\$)	2015년		2020년	
	Min.	Max.	Min.	Max.
민간보안	37.4	81.6	85.6	455.0
군사보안	13.2	28.8	17.7	63.1
화학무기	2.2	4.9	2.5	7.1
생물무기	2.2	4.9	2.8	9.4
총계	44.6	97.2	108.9	534.7

<자료>: Terahertz Systems, Thintri Market Study 2010.

2015년과 2020년의 최소 및 최대 예측치를 보였다.

V. 결론

테라헤르츠파 기술의 주요 응용분야인 생체의료 및 보안검색 시스템에 대하여 기술적 문제점과 대책, 시장성에 대한 향후 전망 등에 대하여 살펴보았다. 1990년대 등장 초기에 걸었던 기대와 달리 최근까지도 기술적인 문제 및 문화적인 측면에서 여러 가지 장애요인이 있었으며 비관적인 의견이 많았다. 그러나 2007년 이후 기술적인 해결책이 제시되고 새로운 응용기술 및 제품기술이 개발되면서 미래에 대한 테라헤르츠 기술시장은 낙관적인 전망이 지배적이다. 특히 생체의료분야의 바이오칩과 보안검색분야의 원격 감지기술은 많은 수요가 예상되어 거대 시장을 형성할 것으로 판단된다.

이와 같은 추세에 따라 최근에는 테라헤르츠파 기술의 연구개발 열기가 급증하고 있으며, 그동안 난제로 알려져 왔던 여러 가지 장애기술들이 모두 해결될 것으로 기대된다.

● 용어해설 ●

지문 스펙트럼(fingerprint spectrum): 물질의 구조, 성분에 따라 가지는 고유의 흡수 주파수 대역으로 마치 지문과 같이 미확인 물질의 규명에 사용된다.

펨토초 레이저(femtosecond laser): 펄스폭이 수~수십 펨토초(10^{-15} 초)에 이르는 극초단 펄스파로 피크의 출력은 수 GW에 달한다. 이를 이용하여 초미세 가공 및 테라헤르츠파 발진에 활용한다.

스탠드 오프(stand-off): 테라헤르츠파의 발생 및 검출기를 대상 시료와 원거리리에 두고 분광 및 영상을 얻어내는 것을 뜻한다. 대부분 반사파를 이용하여 정보를 얻어낸다.

약어 정리

BIDS Biological Integrated Detection System

BCBP	Bureau of Customs and Border Protection
cDNA RT	complementary DNA Reverse Transcription
CLD	ChemiLuminescence Detection
DNA	Deoxyribo Nuclei Acid
GC	Gas Chromatography
IMS	Ion Mobility Spectrometer
ITMS	Ion Trap Mobility Spectrometer
LDB	Low Dose Backscattered
LOC	Lab-on-a Chip
QR	Quantum Resonance
RNA	Ribo Nuclei Acid
TDS	Time Domain Spectroscopy

참고 문헌

- [1] C. Fattering and D. Grischkowsky, "Terahertz Beams," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.54, No.6, 1989, pp.490-492.
- [2] P.H. Siegel, "Terahertz Technology," *IEEE Trans. Miceow. Theory*, Vol.50, No.3, Mar. 2002, pp.910-928.
- [3] M.C. Beard, G.M. Turner, and C.A. Schmuttenmaer, "Terahertz Spectroscopy," *J. Phys. Chem. B*, Vol.106, No.29, 2002, pp.7146-7159.
- [4] B. Ferguson and X.-C. Zhang, "Materials for Terahertz Science and Technology," *Nature Materials*, Vol.1, 2002, pp.26-33.
- [5] D. Abbott and X.-C. Zhang, "Scanning the Issue: T-ray Imaging, Sensing and Retection," *Proc. IEEE*, Vol.95, No.8, 2007, pp.1509-1513.
- [6] M.R. Scxrfi, M. Romano, R. Di Pietro, O. Zeni, A. Doria, G.P. Gallerano, E. Giovenale, G. Messina, A. Lai, G. Campurra, D. Conigilio, and M. Arinzo, "THz Exposure of Whole Blood for the Study of Biological Effects on Human Lymphocytes," *J. Bio. Phys.*, Vol.29, 2003, pp.171-177.
- [7] R.H. Clothier and N. Bourne, "Effects of THz Exposure on Human Primary Keratinocyte Differentiation and Viability," *J. Bio. Phys.*, Vol. 29, 2003, pp.178-185.
- [8] X. Song and B. Swanson, "Direct, Ultrasensitive, and Selective Optical Detection of Protein Toxins Using Multivalent Interactions," *Anal. Chem.*, Vol.71, No.11, 1999, pp.2097-2107.

- [9] A. Menikh, R. MacColl, C.A. Mannella, and X.-C. Zhang, "Terahertz Biosensing Technology: Frontiers and Progress," *Chem. Phys. Chem.*, Vol.3, No.8, 2002, pp.655-658.
- [10] B. Ferguson, S. Wang, D. Gray, D. Abbott, and X.-C. Zhang, "Identification of Biological Tissue Using Chirped Probe THz Imaging," *Microelectron. J.*, Vol.33, No.12, 2002, pp.1043-1051.
- [11] R.M. Woodward, V.P. Wallace, R.J. Pye, B.E. Cole, D.D. Arnone, E.H. Linfield, and M. Pepper, "Terahertz Pulse Imaging of Ex-vivo Basal Cell Carcinoma," *J. Invest. Dermatol.*, Vol.120, No.1, 2003, pp.72-78.
- [12] E. Pickwell, B.E. Cole, A.J. Itzgerald, M. Pepper, and V.P. Wallace, "In Vivo Study of Human Skin Using Pulsed Terahertz Radiation," *Phys. Med. Biol.*, Vol.49, No.9, 2004, pp.1595-1607.
- [13] Terahertz Systems: Market Study, Thintri Inc. 2010.
- [14] A. Menikh, R. MacColl, C.A. Mannella, and X.-C. Zhang, "Terahertz Biosensing Technology: Frontiers and Progress," *Chem. Phys. Chem.*, Vol.3, No.8, 2002, pp.655-658.
- [15] M. Nagel, P.H. Bolívar, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, "Integrated Planar Terahertz Resonators for Femtomolar Sensitivity Label-free Detection of DNA Hybridization," *Appl. Opt.*, Vol.41, No.10, 2002, pp.2074-2078.
- [16] S. Mickan, A. Menikh, H. Liu, C. Mannella, R. MacColl, D. Abbott, J. Munch, and X.-C. Zhang, "Label-free Bioaffinity Detection Using Terahertz Technology," *Phys. Med. Biol.*, Vol.47, 2002, pp.3789-3795.
- [17] H.-B. Liu, G. Plopper, S. Earley, Y. Chen, B. Ferguson, and X.-C. Zhang, "Sensing Minute Changes in Biological Cell Monolayers with THz Differential Time-domain Spectroscopy," *Bio-sens. Bioelectron.*, Vol.22, 2007, pp.1075-1080.
- [18] M.C. Kemp, P.F. Taday, B.E. Cole, J.A. Cluff, A.J. Fitzgerald, and W.R. Tribe, "Security Applications of Terahertz Technology," *Proc. SPIE*, Vol.5070, 2003, pp.44-52.
- [19] Data source: Tera-Photonics Team, RIKEN Sendai, ask teraphoto@riken.jp, http://www.riken.go.jp/lab-www/tera/TPHP/index_en.html
- [20] D.J. Cook, B.K. Decker, G. Maislin, and M.G. Allen, "Through Container THz Sensing: Applications for Explosive Screening," *Proc. SPIE*, Vol.5354, 2004, pp.55-62.
- [21] K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno, and Y. Minami, "NonInvasive Inspection of C-4 Explosive in Mails by Terahertz Time-domain Spectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.43, 2004, pp.L414-L417.
- [22] J.E. Parmeter, "The Challenge of Standoff Explosives Detection," in *Proc. IEEE 38th Annu. 2004 Int. Carnahan Conf. Security Technology*, 2004, pp.355-358.
- [23] National Research Council, "Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques," Washington, DC: National Academy Press, 2004.
- [24] J.C. Carter, S.M. Angel, M. Lawrence-Snyder, J. Scaffidi, R.E. Whipple, and J.G. Reynolds, "Standoff Detection of High Explosive Materials at 50 Meters in Ambient Light Conditions Using a Small Raman Instrument," *Appl. Spectrosc.*, Vol.59, 2005, pp.769-775.