테라헤르츠 기술과 헬스 및 센싱

Terahertz Technologies for U-Health and Sensing

백문철 (M.C. Paek) 테라전자소자팀 책임연구원
강승범 (S.B. Kang) 테라전자소자팀 연구원
곽민환 (M.W. Kwak) 테라전자소자팀 선임연구원
강광용 (K.Y. Kang) 테라전자소자팀 책임연구원

목 차

Ⅰ. 서론
Ⅱ. THz 기술 및 시장 전망
Ⅲ. THz 표준화 동향
Ⅳ. THz파의 U-헬스 응용사례
Ⅴ. 당면과제 및 향후 전망
Ⅵ. 결론

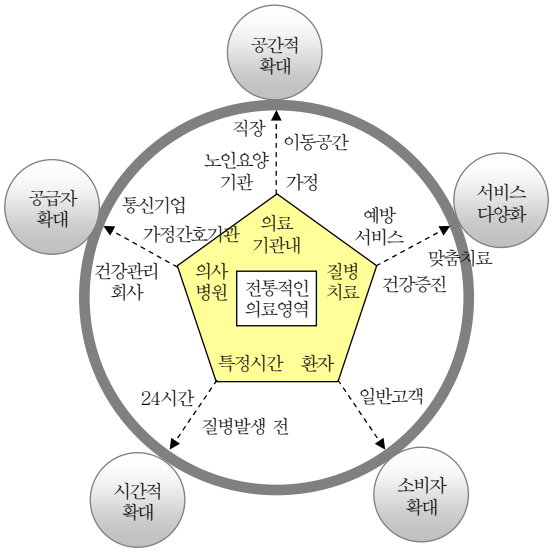
U-헬스 및 센싱기술은 국민의 삶의 질 향상을 위한 첨병역할을 하며 ICT 기술과 함께 의료, 환경 및 보안 기술 등과의 융합화에 의해 그 중요성을 더하고 있다. 테라헤르츠(THz)파는 미개척 주파수 영역에 위치하는 전파 자원으로서 의료, 환경, 보안뿐만 아니라 정보통신, 농식품 산업, 우주천문 등 다양한 과학기술에 적용이 가능한 분야로서 21세기에 들어서 기술의 응용 분야가 다양해지고 있다. 본 고에서는 THz 기술 분야의 연구개발 동향과 시장 전망 및 표준화 전망에 대하여 살펴보고, 특히 U-헬스 및 센싱 기술에 기여할 수 있는 THz 기술의 특징과 전망 그리고 향후 대응전략 등에 대하여 논하였다.

I. 서론

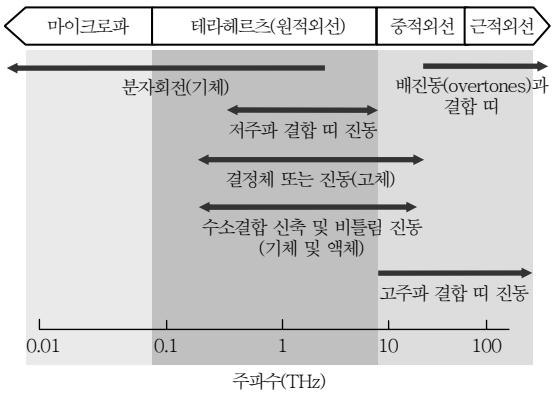
U-헬스는 원격 환자 모니터링과 같이 유무선 통신망을 이용하여 시공간적 제약없이 이용할 수 있는 건강관리 및 의료서비스를 뜻한다[1]. 우리나라에서도 1990년대 이후 생명공학 및 의공학 분야에 대한 투자가 본격화되면서 주목 받기 시작하여 일부 기업에서는 이러한 U-헬스가 이미 가시적인 성과를 보이는 단계에 와있다. 또한 정보통신기술과 보건 의료기술의 발전, 의료기관의 수요 증가 및 고령화 시대의 도래, 그리고 통신 및 소프트웨어 업체의 비즈니스 영역확장과 정부 주관부처의 촉진 정책 등에 힙입어 U-헬스 및 센서기술의 인식은 더욱 그 중요성을 더하고 있다[1].

이러한 U-헬스의 기능과 역할을 (그림 1)에 도표로 나타내었으며 전통적인 의료 영역에서부터 가정, 직장 및 모든 분야에 걸쳐 공간적, 시간적인 확대에 의해 다양하고 풍부한 서비스를 할 수 있음을 보여주고 있다. 그러므로 U-헬스가 제대로 기능을 하기 위해서는 정보통신 기술의 기반이 무엇보다 필요하며, 특히 원격으로 진단하고 치료하는 첨단 의료·진단 시스템이 요구된다.

THz파는 0.1THz에서 10THz 범위의 주파수에 해당하는 전자기파로서 밀리미터파인 전파와 원적외선 영역인 광파의 중간 영역에 위치하며, 적절한 광원의 개발이 이루어지지 않아 현재까지는 미개척 영역으로 남아있었던 부분이다[2],[3]. 이 THz파는 광파의 직진성과 전파의 투과성을 모두 보유하면서 양쪽 영역의 장점을 모두 지닌 특성을 가지고 있다. 특히 수분에 의한 흡수가 커서 대기 중의 원거리 통신 등에는 활용이 어려운 단점이 있는 반면에, 대부분이 수분으로 이루어진 생체에 대해서는 손상이 없이 고유 특성을 진단하고 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 전자파와 달리 자기장이나 전기장의 영향을 받지 않으며, 투과력이 강한 데 비하여 x-선이나 자외선, 고출력 레이저 등과 같이 생체조직에 손상을 주지 않는 것이 큰 장점이다. 이러한 특성을 이용하여 인체 및 생체조직에 대한 투과영상을 피검사자가 인식하지 않는 상태에서도 얻어낼 수 있다. 이러한 특징으로 인하여 THz파는 x-ray에 대한 상대적인 개념으로 T-ray로 불리기도 한다. (그림 2)는 THz파의 주파수 영역에서 여러 가지 분자진동의 범위를 보인 것이다. 이 그림에서 보듯이 THz 영역은 일반적인 분자진동 중에서 비교적 느린 생체기능과 관련된 큰 분자진동에 깊이 관여되어 있으며, 특징적인 지문 스펙트럼(finger print)을 보여주는 소재가 발견되고 있기도 하다. 따라서 THz를 이용하여 수소결합 상태의 차이(예를 들어, DNA의 사슬구조 등)도 판별 가능하며, 현재와 같이 유해한 마커(marker) 물질을 사용할 필요없이 간편하고 빠르게



(그림 1) U-헬스의 기능 및 역할



(그림 2) THz 영역에서의 분자진동

분자수준의 진단을 할 수 있다. 또한 암세포와 정상 세포의 식별과 같이 세포 및 조직수준의 진단도 가능한 것으로 알려져 있다.

본 고에서는 U-헬스 및 센서에 대한 관심이 최근 크게 증폭됨에 따라, 새롭게 개발되기 시작하는 THz 기술이 이 분야에 어떻게 영향을 미칠 것이며 어떻게 응용될 것인지에 대하여 국내외 기술 동향 및 표준화 동향 등을 조사 분석하였다. 그리고 현 시점에서 해결해야 할 문제점 및 대책 등에 대하여 논하였다.

Ⅱ. THz 기술 및 시장 전망

1. 기술개발 동향

THz광은 일반적인 원적외선이나 수은램프 및 자연적으로 발생하는 인코헤런트 광원과 레이저 기술을 기반으로 하는 코헤런트 광원으로 구분된다. 발진 및 검출 등을 인위적으로 제어하고 기술적으로 응용하기 위한 목적으로는 코헤런트 광원을 취급하며 여기에서도 이에 대한 기술만을 언급한다.

THz파의 기술 개발은 크게 THz를 발생/검출하는 신호원, 즉 광원기술과 THz파를 이용한 영상 및 분광기술, 그리고 통신기술로 구분된다. 광원기술은 검출 및 감지방법이나 응용목적 등에 따라 여러 가지가 실용화되거나 연구개발중에 있으며 THz파의 여기 방법에 따라 레이저를 이용하는 방법과 전류주입에 의한 방법으로 구분한다[4],[5]. 레이저를 사용하는 경우는 펨토초 펄스레이저를 이용하여 반도체 소자(광전도 안테나, 광정류 효과, 반도체 표면, 초전도체 등)를 여기시키는 방법[6]-[10], 비선형 광학결정을 이용하는 방법[11], 두 개의 레이저 주파수 차이를 이용하는 방법[12],[13], 비선형 조사를 이용한 파라메트릭 발진기를 이용하는 방법[14],[15] 등이 있다. 전류주입에 의한 방법에는 양자폭포레이저(QCL)[16],[17] 및 자유전자레이저(FEL)를 이용하는 방법[18] 등이 해당한다. 펨토초 레이저를 이용하는 광전도 안테나 방법은 가장 대표적인 THz 발생 방법으로 THz파의 검출에도 사용된다. 이러한 기술개발을 위해서는 소재의 개발이 우선하며, 초전도체, 강자성체, 강유전체 등의 산화물계 강상관계 전자소재(SCEM)를 비롯한 유기물 소재와 반도체 소재 등에 대한 연구가 이루어지고 있다. 분광 및 영상기술은 THz파의 투과성, 직진성, 인체 무해성 등의 특성을 살리는 분야로써 이미 의료 및 보안 감시 분야에서는 실험적으로 성공을 거두고 있는 단계이며, 상업화가 가장 이른 시기에 달성될 것으로 기대되는 분야이기도 하다. 이상적인 형태의 분광 및 영상기술은 실시간으로 결과를 얻어내는 것으로써 고출력의 정밀한 광원과 고속의 데이터를 수집하고 처리하는 기술이 필요하다. 공항, 항만, 병원 등에서 요구하는 실시간의 의료 영상과 생체 물질 분석을 위한 광대역 고정밀 분광기술 등이 주요 연구대상 기술분야이다[19].

THz파는 수분에 의한 흡수계수가 커서 대기 중으로 전달할 수 있는 거리가 한계가 있다. 그러므로 무선통신용으로는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 감쇄율이 낮은 일부 주파수 영역이 수백 GHz 대역에 존재하고 있으며 일본 NHK 등에서는 이를 이용한 근거리 무선 통신을 위해 많은 연구를

광전도 안테나(Photoconductive antenna): THz파를 발생하거나 검출하는 소자의 하나로서, 반도체 소재 표면에 한 쌍의 전극을 구성한 형태임. THz파 발생 시에는 도 안테나(Photoconductive antenna):

을 구할 수 있다. 즉, THz 주파수 영역에서 분광측정의 목적은 복소굴절률 및 복소유전율의 주파수 의존성을 구하는 데에 있다. 이로부터 물질의 전도도 특성을 비롯한 투과율, 반사율 및 흡광도 등을 측정하여 데이터베이스화하면 U-헬스뿐만 아니라 THz 기술의 전 분야에 걸쳐 응용분야가 확대될 것이다.

데이터베이스를 구축하는 데에는 간편한 분광측정 시스템과 표준 측정법이 필요하며 동시에 표준시료를 선정할 필요가 있다. 표준시료의 분광스펙트럼을 측정해 스펙트럼이 올바로 측정되어 있는지를 평가함으로써 측정시스템의 표준화가 가능하며, 앞으로 THz파의 산업화가 진행될 때 적어도 국내의 3~4곳에 물성치의 표준측정을 할 수 있는 거점을 설치해야 할 것이다. 표준시료는 안전하고 화학적으로도 안정적이며, 입수하기 쉬운 물질이 요망된다. 현재로서는 실리콘 웨이퍼 등이 가능하며, 스펙트럼의 x-축에 대한 정밀도를 위해서는 수증기의 회전 스펙트럼이 사용될 가능성이 있다.

4. 주파수 및 전력 표준

THz파의 활용분야에 따라 인체를 비롯한 생체조직의 의료, 진단을 위한 분광 시스템의 사용주파수와 영상장치의 주파수에 대한 표준규격이 요구될 것이며, 근거리 무선통신용으로 확장할 경우 통신용 주파수에 대한 신호원 표준 및 절대 주파수 측정 시스템 등이 필요하게 되어 이에 대한 사전 검토가 요구된다. 또한 고출력 THz파를 사용하여 영상 시스템을 고급화하고 응용범위를 확장하게 되면 THz파 워에 대한 표준이 필요하게 될 것이다.

이 때를 대비하여 THz 주파수 표준에 필요한 요소기술이 무엇인지 검토할 시기가 다가오고 있으며, 국내에 연구기관 간의 협력체제, 연구체제, 연구요소 정리 및 연구방향성에 대한 충분한 검토가 요구된다. 요소기술로서는 (1) 표준용 신호원, (2) 절대 주파수 측정 시스템, (3) 정밀 분광용 THz 전자파 신디사이저 등의 실현을 위해 다양한 관점에서 검토하는 것이 필요하다.

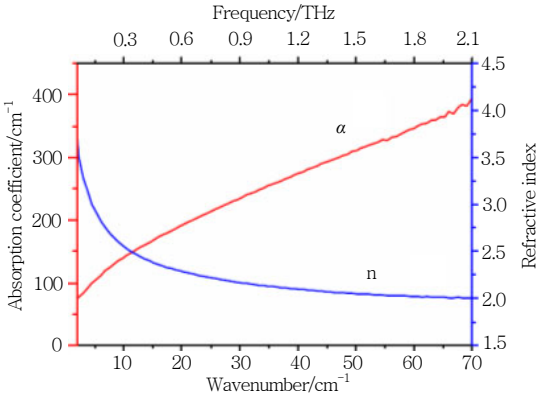
U-헬스의 경우 THz파를 직접 및 간접적으로 인체에 투사하는 경우가 많으므로 전자파의 에너지는 가장 기본적인 측정량 중의 하나이다. 파워미터나 스펙트럼 애널라이저 등은 전자파의 파워와 강도를 측정대상으로 하며, 측정치의 신뢰성 유지를 위해 측정기의 보정은 필수적이다. 레이저나 마이크로파 등의 경우는 계측기술 보급 및 산업계의 요구에 의해 전자파 에너지의 측정 기준이 되는 국가표준이 정비되어 있으나, THz대에서는 지금까지 범용적인 기술이 확립되지 않았기 때문에 표준이 확립되지 않은 상태이다. 그러나 미개척 영역의 계측 기반기술로서 THz 전력표준은 필수적이다. 미국, 일본 등의 국가 표준 기관에서는 THz 전력표준에 대한 연구개발을 시작하고 있으며, 향후 THz 계측기술의 국제 경쟁력 향상을 위해 우리나라에서도 산업계의 요구에 유연하게 대응할 수 있는 THz대의 전력표준에 대한 조기 정비가 요망된다.

Ⅳ. THz파의 U-헬스 응용사례

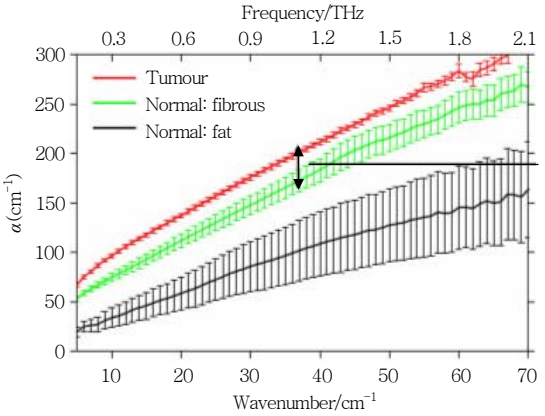
THz파를 이용한 응용기술은 크게 분광 스펙트럼과 영상기술, 그리고 통신기술을 들 수 있다. U-헬스용으로는 인체의 진단이나 의료영상 등의 분야가 있으며, 생체 물질에 대한 확인 및 분석 등이 해당된다. 그리고 의료기관이나 개인 간의 근거리 광대역 무선통신을 위한 통신기술도 적용된다. 여기에서는 주로 의료용에 집중하여 현재까지 적용되어 발표된 사례들을 정리해 보기로 한다.

(그림 3)은 수분에 대한 THz 분광 스펙트럼으로 주파수에 따른 흡수계수와 굴절률의 변화를 보이고 있다. 수분은 생체를 이루고 있는 가장 중요한 구성물질로서 이러한 데이터를 기준으로 하여 THz파를 이용한 의료진단 및 치료에 적용된다. 그 예로써 (그림 4)는 종양이 있는 부위의 유방 세포조직과 정상 세포간의 THz 분광 스펙트럼을 측정한 것이다. 종양이 있는 부분의 세포가 건강한 생체세포에 비하여 수분함량 및 구성 조직이 달라 THz파 영역에서 흡수율과 굴절률이 모두 증가한 것을 볼 수 있다. (그

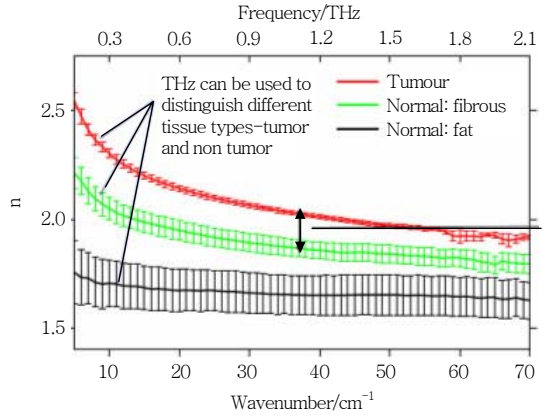
림 4a)는 THz파의 흡수계수를, (그림 4b)는 굴절률을 각각 나타낸 것으로 정상조직에 비해 증가한 것



(그림 3) 수분에 대한 THz 분광 스펙트럼. 주파수에 따른 흡수계수와 굴절률의 변화를 측정



(a) 흡수계수

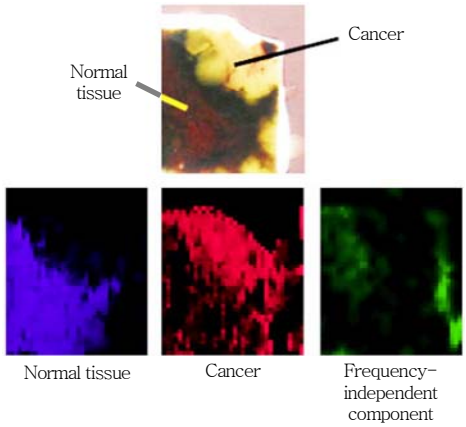


(b) 굴절률

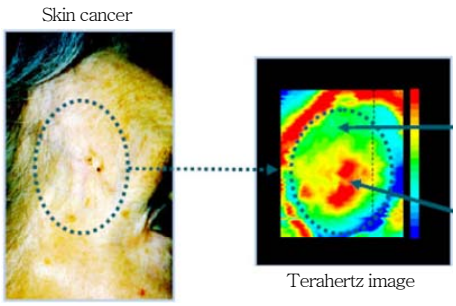
(그림 4) 유방암 조직과 정상조직 간의 THz파

을 볼 수 있다. 굴절률의 경우 THz 분광 스펙트럼으로는 0.2%의 차이를 감지할 수 있는데, 그림에서는 14% 정도의 차이를 보였다. 따라서 종양조직의 판별에 매우 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있다. (그림 5)는 이러한 특징을 영상으로 보인 것이다 [25]. 유방암에 걸린 조직의 일반 광학 영상으로서 육안으로는 암조직의 판별이 어렵다. 그러나 (그림 4)와 같이 분광 스펙트럼으로부터 얻은 물질계수의 차이를 2차원으로 영상화하면 (그림 5)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 진단법은 비파괴성이며, 인체에 무해한 기술로서 피검사자의 정신적이거나 육체적인 스트레스 없이 실행할 수 있다는 것이 큰 장점이다.

이와 같이 THz 분광 및 영상기술을 이용하여 암을 진단한 사례는 매우 많으나 여기에서는 중요한 몇 가지만을 들어 살펴보기로 한다. (그림 6)은 피부



(그림 5) 암조직과 정상조직 간의 THz파 특성 차이를 이용하여 얻어낸 영상



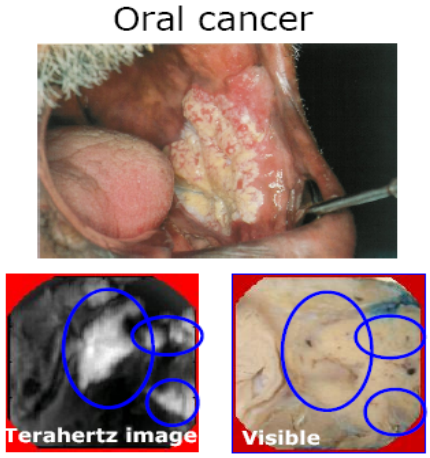
(그림 6) 피부암 세포조직의 THz 영상

암에 걸린 조직의 THz 영상인데 정상세포에 비하여 암조직은 THz 주파수 영역에서 흡수계수가 증가하므로 이를 감지하여 나타낸 것이다. 특히 THz파의 투과성을 이용하여 피부 표면 상으로 육안으로 감지할 수 없는 부위를 대상으로 피부 아래 약 1mm 깊이에 대한 영상을 얻어내었다. 그림에서와 같이 육안으로 보기와 달리 넓은 영역에 걸쳐 암조직이 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

다음의 사례는 구강암의 경우로써 (그림 7)과 같이 가시광선 영상과 THz 영상을 비교하여 본 것이다. 구강 내의 이상 조직은 쉽게 발견할 수 있으나 암조직 여부는 가시광 영상으로는 판별할 수 없는데 THz 영상으로 관찰할 경우 그림과 같이 선명하게 구별할 수 있음을 알 수 있다.

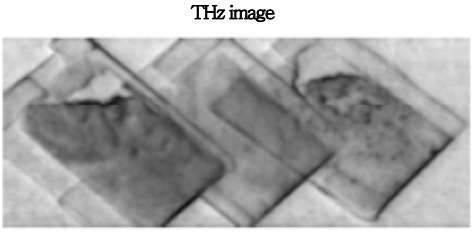
다음은 THz 분광 스펙트럼과 영상장치를 이용하여 마약류를 비파괴 분석으로 감지한 경우이다. (그림 8a)는 동일한 모양을 가지는 3가지 흰색 분말로서 우편물 봉투 안에 들어있는 상태이다. (그림 8b)는 위 시료에 대한 x-선 영상으로서 각 시편의 형태만 확인할 수 있을 뿐, 종류와 성분 등 화학적인 정보는 얻을 수 없다. 그러나 THz파를 이용한 영상분석에서는 이미 구축되어 있는 데이터베이스를 통해 코카인과 아편(코데인) 및 자당(사탕수수 당류)의 스펙트럼을 활용하면 (그림 8c)와 같이 뚜렷한 콘트라스트 차이를 보이는 영상으로 나타난다[25]. 즉, 우편물 봉투의 비파괴 분석으로 내부에 있는 분말의 성분과 종류 등을 정확히 판별해낸 사례이다.

THz파가 보안 감시용으로 응용된 사례를 살펴보기로 한다. (그림 9)는 구두창 밑에 세라믹 칼을 숨긴 것을 THz파를 이용하여 찾아내는 경우를 보이는 것이다. 일반적인 금속제 칼을 감출 경우 금속탐지기나 x-ray에 의해 감지가 되어 공항, 항만 및 경비

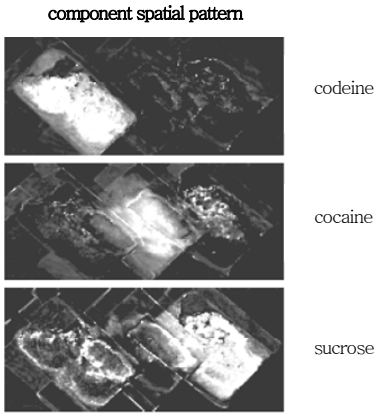


(그림 7) 구강암 조직에 대한 일반 영상과 THz 영상의 비교

(a) 마약, 아편 및 자당의 3가지 흰색 분말 시료를 육안으로 관찰한 형태



(b) (a)의 x-선 영상



(c) (a)의 THz파 영상

(그림 8) THz 분광 및 영상기법으로 얻어낸 마약, 아편 및 자당의 분별 사례

(그림 9) 구두창 밑에 숨긴 세라믹 흉기를 THz 영상으로 감지한 경우. 일반 x-ray로는 감지할 수 없다.

구역에 감추어 들어갈 수가 없다. 그러나 세라믹으로 제작된 칼의 경우 금속탐지 및 x-선으로 감지하기가 쉽지 않다. 이 경우에 THz파 영상기법을 적용하면 본 사례와 같이 감지가 가능하다.

V. 당면과제 및 향후 전망

THz 기술의 연구는 1990년대에 주로 발생장치와 검출기에 관한 기반연구가 추세였으나 현재에는 그 기반기술을 바탕으로 여러 가지 응용분야에 적용할 수 있는 분석, 검사 및 통신 장치 등의 시스템화 기술개발로 확대되고 있다. 따라서 응용분야의 다양화 및 요구사항의 난이도 등을 파악하여 각종 소재나 화학물질 등의 분광 데이터베이스를 조속히 구축하는 것이 중요하다. 그리고 THz파 기술이 현재까지 없던 것이므로 산업화 과정에서 새로운 수요를 창출할 수도 있으며 특히, 킬러 애플리케이션을 발굴하는 것이 필요하다. 이는 THz 산업화에 자극이 될 수 있으며 애플리케이션 정보를 상호 공개함으로써 시장구축을 가속시킬 수 있기 때문이다. 특히 THz 분광 및 영상기술을 여러 분야에 투입시키기 위해서는 스펙트럼 데이터의 라이브러리와 해석 소프트웨어 기술도 동반하여 발전되어야 한다.

U-헬스와 관련하여 기술적인 측면에서 당면한 과제를 응용분야별로 살펴보면, 먼저 분광시스템인 THz-TDS의 고속화, 저가격화, 다기능화를 기본으로 하여 응용분야의 용도별로 기기개발이 진행될 것이다. 보안·감시 분야에서는 위험물, 금지약물 검사 시스템 등이 선행되고 생체인증 방식이 일반화될 것이다. 의료, 생명공학 분야에서는 데이터베이스 정비와 병행하여 결정다형 및 DNA 분석, 암 진단 등의 전개가 진행된다.

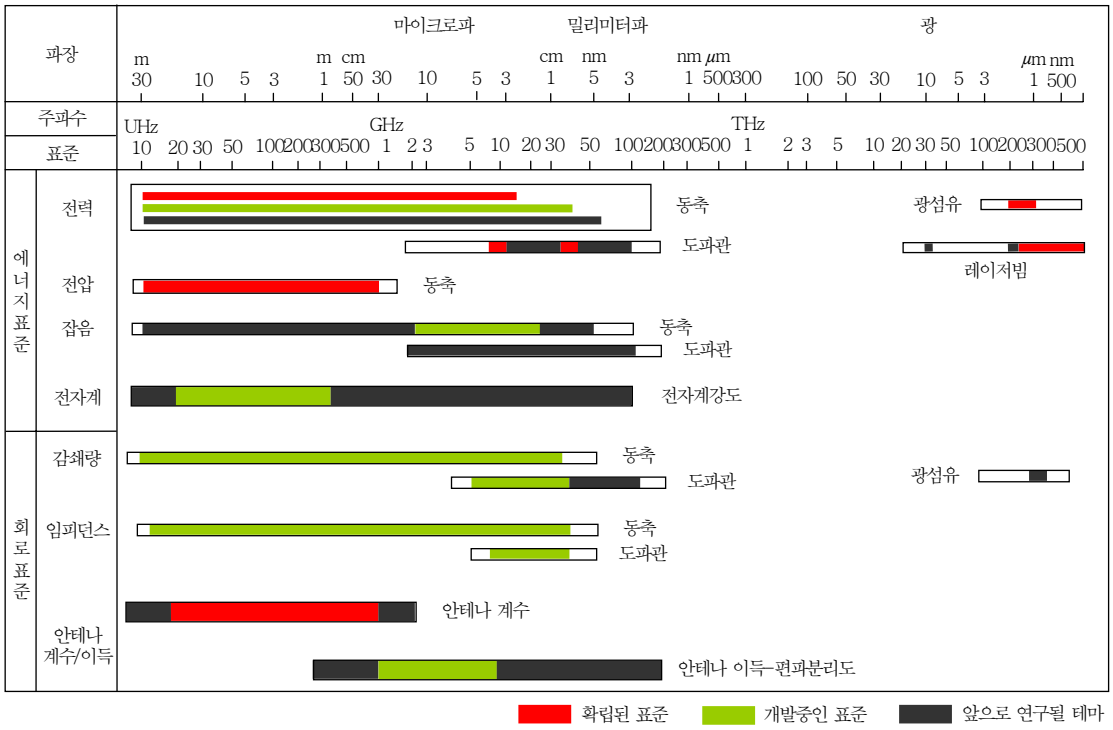
그리고 위와 같은 응용개발을 추진하는 데에 있어 기본기술의 개발이 필요한데, 각 요소별로 요구되는 과제로는 다음과 같은 것들이 있다. 먼저 시스템의 소형화가 중요한 과제로 떠오르는데 이것은 상용화를 앞당기는 저가격화, 고성능화와 직결되는 사항으로써 광섬유를 이용한 펨토초 레이저 및 마이크로 칩 레이저를 이용하는 기술의 개발에 달려 있다. 그리고 새로운 THz 광원으로써 크게 기대되는 양자폭포 레이저 QCL 기술에서 실온동작과 낮은 문턱전압 등의 기술적 난제를 풀어야 한다. 이 문제가 해결되면 THz 영상제품을 조기 상용화 할 수 있으며, 소자 다중화 기술을 통하여 다파장 동시 발진 등이 가능해지면 고출력 특성도 얻을 수 있다. 또한 광원의 개발 분야에서는 비시간 영역분석 및 영상기술과 비선형 공학소재의 개발 등이 중요한 과제이다.

THz 영상기술은 점 센서를 이용하여 물체를 주사(scanning)하면서 영상을 얻어내는 주사형 기술과 2차원 영상센서를 이용하여 동시에 영상을 얻어내는 2가지 기술이 있는데, 주사형 영상기술이 일반적이며, 이 경우 주사속도가 가장 큰 문제점이다. 한편 2차원 영상 센서는 센서배열을 이용한 영상화와 전기광학(EO) 효과와 CCD를 조합한 영상화 기술이 있다. 이 경우에는 EO 결정의 대구경화가 과제이다. 향후 THz-TDS에 의해 U-헬스를 위한 인체 및 생체조직에 대한 방대한 데이터가 수집되면 고속, 고신뢰도의 데이터 신호처리기술도 중요하게 될 것이다. 그러므로 측정, 분석의 고속화를 위한 영상처리 기법 및 영상 알고리듬 개발 등의 연구도 필요하게 된다. 전파자원의 하나로써 THz파의 효율적인 이용이라는 관점에서 보면 통신, 레이더를 비롯하여 민생, 공용 및 의료과학 분야의 응용을 위해서는 해당 정부부처의 인허를 얻어야 한다. 현 시점에서는 300

GHz 이하의 주파수 대역이 초고속, 대용량, 고품질을 지향하는 차세대 IT 분야의 응용서비스 제공에 한계가 있고 점차 전파자원이 고갈되어 가고 있는 단계이다. THz 주파수 대역은 지금까지 범용적인 발생/검출 기술이 확립되지 않았기 때문에, 산업계에서의 THz파 이용이 일반화되지 않았으며 핵심표준도 확립되지 않았다. 그러나 U-헬스를 비롯한 여러 분야에서 THz파의 이용이 크게 주목을 받게 되면 주파수 자원으로서의 효율적인 관리 및 표준화 등은 큰 의미를 가지게 될 것이다. (그림 10)은 현재 전자파의 주파수 대역에 따른 에너지 및 회로 표준을 나타낸 것이다[26]. 그림에서와 같이 THz파 대역은 빈 공간으로 되어 있음을 알 수 있다. 현재는 국제적으로도 THz 주파수 표준에 대한 협약이나 국제간 협력 등이 미진한 상태이다. 그러므로 이를 미리 선점할 수 있는 기회로 볼 수 있다. 이를 위해서는 기술의 국제경쟁력을 강화해야 하며, 표준확립을 위한 정부, 학계 및 관련기관 간의 협조가 매우 필요한 실정이다. 특히 U-헬스의 경우 데이터베이스의 구축과 함께 근거리 무선통신의 표준 규격이 중요한 항목으로 등장할 것으로 전망된다.

Ⅵ. 결론

정보통신 네트워크의 초광대역화에 기반하여 이른바 U-헬스의 일반적인 응용이 가능한 시대가 도래하고 있다. 그리고 새로운 주파수 자원으로서, 또한 전자파와 광파의 장점을 모두 지닌 새로운 분석 도구로서 THz 기술이 산업화를 목표로 개발되고 있다. U-헬스와 THz 기술의 조화있는 결합은 기술과 시장, 그리고 사회적인 측면에서도 커다란 혁신을 가져올 것이며 결과적으로 국민의 삶의 질 향상에 크게 기여할 것이다. 그러나 미래에 대한 기대 못지않게 풀어야 할 과제가 많이 존재하고 있다. 기술적인 문제뿐만 아니라 국제적인 협력관계 및 표준규격 확립 등이 이에 해당하며, 특히 주파수자원의 효율적인 관리 측면에서 법제도의 정비가 요구된다.



(그림 10) 전자파의 주파수에 따른 에너지 및 회로표준

약 어 정 리

EMC	Electro Magnetic Compatibility
EMI	Electro Magnetic Interference
EMS	Electromagnetic Susceptibility
FEL	Free Electron Laser
QCL	Quantum Cascade Laser
RPI	Rensselaer Polytechnic Institute
SCEM	Strongly Correlated Electronic Materials
THz-TDS	Terahertz Time Domain Spectroscopy

참 고 문 헌

[1] 삼성경제연구소, "U-헬쓰의 경제적 효과와 성장전략," 2007.

[2] X.C. Zhang, "THz Wave Technologies and Applications," SPIE 2005 Workshop, 2005.

[3] J.A. Deibel, "Generating, Guiding & Detecting THz Radiation," Rice Univ, Topics in Nano-photonics, 2006.

[4] 강광용, 백문철, 한석길, 이승권, 김현탁, "테라헤르츠 광전자공학," 전자통신동향분석, 제21권 제4호, 2006. 8., p.118.

[5] 윤두협, 곽민환, 유용구, 류한철, "테라헤르츠파기술의 현황과 전망," 전자통신동향분석, 제21권 제4호, 2006. 8., p.129.

[6] M. van Exter, Ch. Fattinger, and D. Grischkowsky, "High Brightness Terahertz Beams Characterized with an Ultrafast Detector," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 55, No.4, 1989, p.337.

[7] J.L.W. Sieders, S.A. Trugman, F.H. Garzon, R.J. Houlton, and A.J. Taylor, "THz Emission from $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ Thin Films via Bulk Electric-quadrupole-magnetic-dipole Optical Rectification," *Phys. Rev. B.*, Vol.61, No.20, 2000, p.13633.

[8] X.C. Zhang, B.B. Hu, J.J. Darrow, and D.H. Auston "Generation of Femtosecond Electro-magnetic Pulses from Semiconductor Surfaces," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.56, 1990, p.1011.

[9] D.J. Cook and R.W. Hochstrasser, "Intense Terahertz Pulses by Four-wave Rectification in Air," *Opt. Lett.*, Vol.25, 2000, p.1210.

[10] 강광용, 백문철, 곽민환, 강철, "초전도 디바이스를 사용한 테라헤르츠파 검출기," 전자통신동향분석, 제21권 제5호, 2006. 10., p.109.

[11] D.H. Auston and M.C. Nuss, "ElectroOptic Generation and Detection of Femtosecond Electrical Transients," *IEEE J. Quantum Elec.*, Vol.24, 1988, p.184.

[12] K. Kawase, M. Mizuno, S. Shoma, H. Takahashi, T. Taniuchi, Y. Urata, S. Wada, H. Tashiro, and H. Ito, "Difference Frequency Terahertz Wave Generation from DAST by Use of an Electronically Tuned Ti:Sapphire Laser," *Opt. Lett.*, Vol.24, 1999, p.1605.

[13] E.R. Brown, K.A. McIntosh, K.B. Nichols, and C.L. Dennis, "Photomixing Up to 3.8THz in Low Temperature Grown GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.66, No.3, 1995, p.285.

[14] K. Kawase, J. Shikata, and H. Ito, "Topical Review; Terahertz Wave Parametric Source," *J. Phy. D: Appl. Phys.*, Vol.35, R1-24, 2002.

[15] 윤두협, 유용구, 류한철, 이승권, "양자종속 레이저의 현황과 전망," 전자통신동향분석, 제21권 제5호, 2006. 10., p.119.

[16] K. Kawase, H. Minamide, K. Imai, J. Shikata, and H. Ito, "Injection Seeded Terahertz Wave Parametric Generator with Wide Tunability," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.80, No.2, 2002, p.195.

[17] R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram, H.E. Beere, E.H. Linfield, A.G. Davies, D.A. Ritchie, R.C. Iotti, and F. Rossi, "Terahertz Semiconductor Heterostructure Laser," *Nature*, Vol.417, 2002, p.156.

[18] 윤두협, 유용구, 곽민환, 류한철, 이승권, 정세영, "테라헤르츠 이미징과 안전・보안 분야 응용," 전자통신동향분석, 제 21권 제6호, 2006. 12., p.146.

[19] G.L. Carr, M.V. Martin, W.R. McKinney, K. Jordan, G.R. Neil, and G.P. Williams, "High Power Terahertz Radiation from Relativistic Electrons," *Nature*, Vol.420, 2002, p.153.

[20] T. Nagatsuma, A. Hirata, Y. Sata, R. Yamaguchi, H. Takahashi, T. Kosugi, M. Tokumitsu, H. Sugahara, T. Furuta, and H. Ito, "Sub-terahertz Wireless Communications Technologies," Tera-Tech.'05; International Workshop on Terahertz Technology, 16S-3, 2005.

[21] M. Koch, "Indoor THz Communications: a Vision for 2020," Tera-Tech '05-International Workshop on Terahertz Technology, 18A-1, 2005.

[22] Peter de Maagt, "Microwave for Growth," TOSEEA, 2005.

[23] JISC; 1997/IEC60050-161:1990.

[24] 斗內政吉, "Terahertz Technology," 테라헤르츠 테크놀러지 動向調査委員會, Ch.13, 2006, p.212.
[25] K. Kawase, "Terahertz Parametric Source and Real Life Application," SOLS 2004, Korea, 2004.
[26] 斗內政吉, "Terahertz Technology," 테라헤르츠 테크놀러지 動向調査委員會, Ch.13, 2006, p.214.