

전자빔 이용 테라헤르츠 발생 기술

정영욱 (한국원자력연구원)

I. 서론

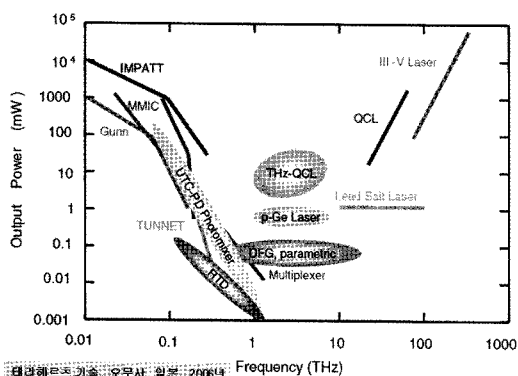
최근 테라헤르츠에 대한 관심이 높아지고 있는 주된 이유 중의 하나는 이제까지 접근이 어려웠던 이 새로운 전자기파 대역이 인류의 삶에 큰 기여를 할 수 있을 것이라는 기대가 크기 때문이다. 그 중에서도 보안검색과 의료진단 분야에서 100여년의 오랜 기간 동안 가장 효과적인 도구였던 X-선을 대체할 수 있을 것이라는 가능성이 기대감의 큰 자리를 차지하고 있다.

X-선은 뛰어난 투과력과 해상도로 소형 화물이나 대형 컨테이너를 투시하여 검색할 수 있으며, 인체내부의 병소를 비접촉으로 확인할 수 있는 가장 경제적이고 효과적인 수단이다. 그러나, X-선은 과다노출 시 그 자체가 암을 유발하는 위험요소가 된다. 이러한 이유 때문에 X-선은 보안검색에서 대인용으로 사용되지 못하고 있다. 의료분야에서도 X-선 피폭을 줄이고자하는 움직임이 강화되고 있어, 미소 병변을 조기에 찾기 위해서 필요한 정기적이고 주기적인 검진의 점증하는 욕구와는 배치되고 있다.

테라헤르츠는 주변 전자기파 대역 중에서 비교적 투과력이 우수하며 인체 조사시 안전하다.

그리고, 분광 특성상 물질 식별이 용이하여 새로운 보안검색과 의료검진 기술로 인정받고 있다. 그러나, 이 새로운 기술은 아직까지 현장이나 병원에서 활용되기에는 몇 가지 넘어서야하는 기술적 한계가 있다. 그 중에서도 가장 선결되어야 하는 문제가 낮은 출력으로 인한 활용의 제한이다.

<그림 1>은 현재 가용한 소형 테라헤르츠 광원의 주파수 대역별 출력특성을 정리한 것이다. 여기에는 본 논문에서 주로 다루는 가속기 전자빔 이용 테라헤르츠 발생장치는 빠져있다. 눈여겨 보아야할 부분은 아직까지 레이저 등 광학적인 기술을 사용하는 발생장치는 적외선에서 테라헤르츠 대역으로 접근하면서 가용 출력이 급격히 낮아지며, 진공 전자소자를 이용하는 기술은 반대로 마이크로파에서 주파수가 점차 높아지면 출력이 역시 줄어드는 특성을 보이고 있는 점이다. 이러한 한계는 두 가지 기술의 물리적 특성에 기인하며, 앞으로도 이러한 한계를 극복하고자하는 노력은 계속 이루어질 것이지만 쉽게 극복될 수 있을 것으로 보이지는 않고 있다. 현재까지 이러한 기술을 사용하여 테라헤르츠 중심 대역에서 현장에 필요한 출력인 1 W급에 접근한 기술은 나오지 않고 있다.



테라헤르츠 기술, 오무사, 일본, 2006년

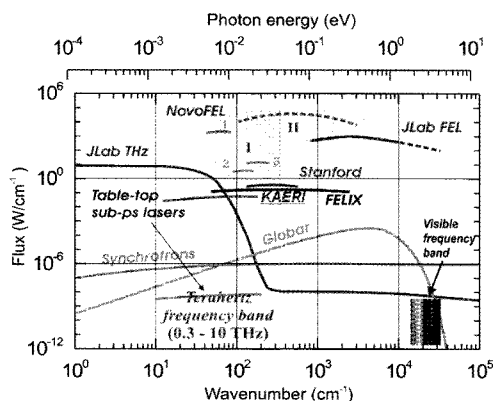
〈그림 1〉 소형 테라헤르츠 광원의 출력 특성

(출처 : 테라헤르츠기술, 오무사, 일본, 2006년)

고출력의 테라헤르츠를 발생시키는 방법으로는 상대론적인 전자빔을 사용하는 것이 가장 효과적이다. 현재까지의 기록을 보면 미국의 JLab (국립제퍼슨가속기연구소)에서 결맞음 방사광으로 약 100 W 평균 출력 달성에 성공하였고, 러시아의 NovoFEL (부드커핵물리연구소, Budker Institute of Nuclear Physics, 노보시비르스크, 러시아)이 평균출력 400 W에 이르는 고출력 발생에 성공하였다.

상대론적 전자빔은 가속기를 사용하여 만든다. 전자빔의 에너지가 1 MeV 이상이면 빛의 속도의 90% 수준을 넘어선다. 5 MeV를 넘게 되면 빛의 속도의 99% 이상에 도달한다. 이렇게 빛의 속도에 가까운 상대론적 전자빔의 운동에너지를 빛에너지로 변환하여 사용하기 때문에 다른 장치와는 달리 파장에 대한 의존도가 없이 높은 출력을 발생시킬 수 있다.

상대론적 전자빔을 사용하는 테라헤르츠 발생 장치는 크게 두 가지로 나누어진다. 발생하는 전자기파 파장과 파장과 비슷하거나 짧은 펄스의 전자빔으로부터 발생하는 결맞음 방사광(coherent radiation)을 이용하는 기술과 전자빔으로부터 레이저를 발생시키는 자유전자레이저(free electron



〈그림 2〉 테라헤르츠 영역에서 동작하는 광원들의 출력 밀도. 다른 광원들은 테라헤르츠 영역에서 출력이 급격히 줄어드는 반면 전자빔 기반 테라헤르츠 발생장치는 높은 출력밀도가 가능하다

(출처 : G. Kulipanov, BINP, Russia)

laser)가 그 대표적인 두 기술이다. 위 〈그림 2〉에서 JLab THz 광원이 가장 대표적인 결맞음 방사광 시설이다. 국내에서는 포항가속기연구소에서 테라헤르츠 결맞음 방사광 빔라인을 건설하고 있다. 국내에서는 한국원자력연구원에서 테라헤르츠 자유전자레이저를 자체 개발하여 운영하고 있으며, 미국, 일본, 중국, 러시아, 유럽에서도 활용되고 있다.

본 논문에서는 테라헤르츠 결맞음 방사광 시설과 테라헤르츠 자유전자레이저에 대해서 개관한다. 그리고, 이들 고출력 테라헤르츠 기술의 소형화 가능성에 대해서 한국원자력연구원에서 진행되고 있는 소형 테라헤르츠 자유전자레이저 기술을 중심으로 살펴보고 마무리하고자 한다.

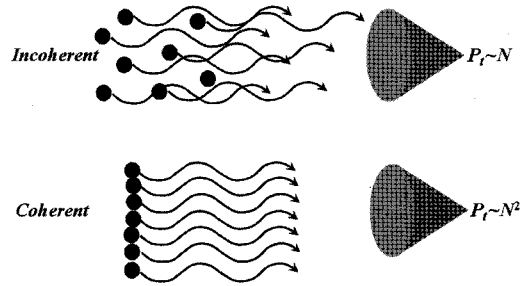
II. 결맞음 테라헤르츠 방사광

결맞음 방사광 기술은 극초단 레이저 및 전자빔 발생이 가능해진 1990년을 전후로 활발히 개

발되었다. 기본적인 원리는 다음과 같다. N개의 전자에서 발생하는 방사광 (전자기파, 또는 협의의 빛)의 총 출력은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_t &= |E_1 e^{-i\phi_1} + E_2 e^{-i\phi_2} + \dots + E_N e^{-i\phi_N}|^2 \\
 &= P \left| \sum_{j=1}^N e^{-i\phi_j} \right|^2 \\
 &= NP + P \sum_{k,q} \cos(\phi_k - \phi_q) \\
 &= NP + N(N+1)PF \\
 &\approx NP + N^2 PF
 \end{aligned}$$

여기서, $F \cong \left[\int \cos(kz) S(z) dz \right]^2$ 는 형태인자 (form factor)라고 하며, S(z)는 전자의 공간분포를 나타낸다. 위 식의 마지막 줄에서 전자수에 비례하는 출력과 전자수의 제곱에 비례하는 출력으로 구분됨을 알 수 있다. 앞의 항을 비결맞음 출력이 라고 하며 뒤의 항은 결맞음 출력이라고 한다. 전자에서 방출되는 방사광의 위상은 전자의 운동에 의해서 결정된다. 일반적으로 고르게 분포된 전자에서 방출하는 방사광의 위상 들은 서로 제멋대로 (random)이다. 이 경우 결맞음 출력 항의 형태인자가 0에 가까워지면서 앞의 항에 비해서 무시할 만큼 미약해진다. 그러나 전자들이 같은 공간에 밀집되어 있어서 전체가 하나의 전자처럼 움직이면, 이 전자들에서 발생한 방사광의 위상은 동일하다. 이 경우 결맞음 출력 항의 형태인자는 1에 가까워진다. 결국, 비결맞음 방사광 출력 대비 최대 전자수 배 만큼의 강력한 결맞음 출력을 얻을 수 있다. <그림 3>은 이러한 비결맞음 방사광과 결맞음 방사광의 출력 증가를 공간 분포에 의한 위상 부정합과 정합으로 나누어서



<그림 3> 전자빔에서 발생하는 결맞음 또는 비결맞음 방사광의 원리

도식적으로 표현한 것이다.

결맞음 방사광을 얻기 위해서는 전자빔의 펄스폭이 방사광의 파장보다 짧아야 한다. 테라헤르츠 대역의 파장은 약 0.3 mm 내외이다. 즉, 전자빔의 펄스폭이 0.3 mm (시간적으로는 1 ps)보다 짧은 경우 전자수에 비례하는 강력한 출력 증가를 얻을 수 있다. 파장 대비 펄스폭의 짧은 정도에 따라서 방사광의 출력 증가도 달라진다. 이미 1990년을 전후로 실험적으로 다양한 결맞음 방사광이 실증되었다. 이들은 주로 수 ~수 십 피코초의 전자빔 펄스폭을 이용하였으며, 밀리미터와 대역에서 강력한 결맞음 방사광을 관측할 수 있었다. 최초의 결맞음 방사광 발생 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- 결맞음 싱크로트론 방사광 (Coherent Synchrotron Radiation), T. Nakazato, et al., Phys. Rev. Lett. 63, 1245 (1989)
- 결맞음 언듈레이터 방사광 (Coherent Undulator Radiation), Y. U. Jeong, et al., Phys. Rev. Lett. 68, 1140 (1992)
- 결맞음 천이 방사광 (Coherent Transition Radiation), U. Happek, et al., Phys. Rev. A 67, 2962 (1991)

- 결맞음 체렌코프 방사광 (Coherent Cherenkov Radiation), J. Ohkuma, et al., Phys. Rev. Lett. 66, 1967 (1991)

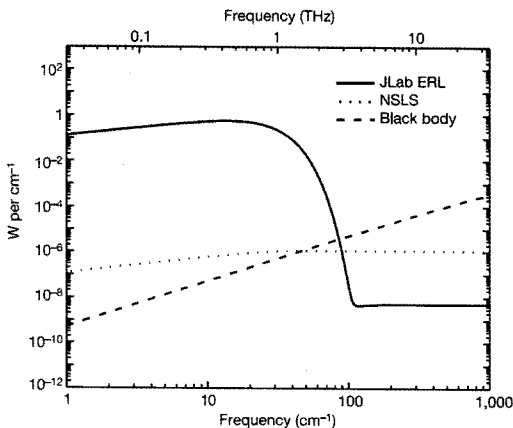
극초단 기술의 발전으로 2,000년대에 들어서서는 전자빔 펄스폭이 펨토초 영역에 들어섰다. 이 경우 테라헤르츠 대역에서 강력한 결맞음 방사광 발생이 가능해진다. <그림 4>는 미국 JLab (국립제퍼슨가속기연구소)의 에너지회수형가속기를 이용한 결맞음 방사광 발생 결과이다. 방사광의 주파수가 적외선 영역에서 테라헤르츠 대역으로 낮아지면서 출력 증가가 10억배 가까이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이 기술로부터 평균 출력 150 W의 고출력 테라헤르츠 발생을 실증하였다^[1].

최근에는 미국과 유럽의 다양한 방사광 가속기 시설에서 결맞음 테라헤르츠 빔라인을 건설하여 운영하고 있으며, 국내에서도 포항가속기연구소에서 광전자총과 선형가속기를 이용한 결맞음 방사광 빔라인을 구축하고 있다. 최근, 고출력 결맞음 테라헤르츠 빔 발생에 성공하는 등 선진국 수준의 우수한 시설 구축이 이루어지고 있으

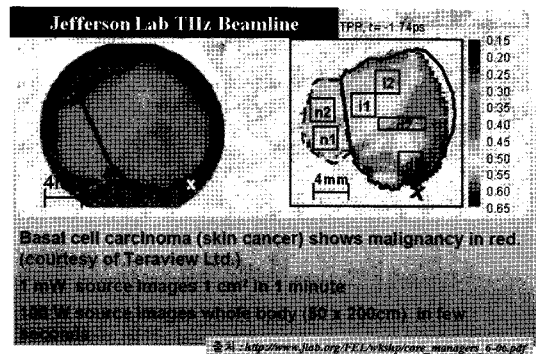
며, 이를 활용한 첨단 응용 연구가 가능할 것으로 큰 기대를 모으고 있다.

고출력의 테라헤르츠 빔은 이제까지 실험실에서 이루어지던 응용연구의 폭을 실제 활용까지 근접시키는 것을 가능하게 하고 있다. <그림 5>는 JLab과 영국 테라뷰(Teraview)사가 공동으로 테라헤르츠 빔을 이용한 인체 피부암 진단에 필요한 출력과 시간을 평가한 결과이다. 100 W 출력의 경우 전체 몸을 테라헤르츠로 진단하는데도 수 초면 가능하다는 결론을 얻었다.

그러나, 테라헤르츠 방사광은 여전히 규모가 아주 큰 시설이다. 현장에 적용하는데 필요한 출력은 이미 넘어서고 있지만, 장치의 크기가 너무 크고 고가여서 실제 활용에 큰 제약이 되고 있다. 이러한 고출력의 장치를 소형화하는 것이 앞으로 테라헤르츠 기술을 현장에 적용하는데 중요한 과제가 되고 있다. 결맞음 테라헤르츠 방사광 시설에서 발생하는 광대역의 고출력 테라헤르츠 빔은 비선형 연구, 테라헤르츠 생체 및 광화학 분광연구 등 다양한 최첨단 연구에 주로 활용되고 있다.



<그림 4> 미국 JLab 에너지회수형가속기에서 얻은 테라헤르츠 결맞음 방사광 발생 결과



<그림 5> 고출력 테라헤르츠를 이용한 의료분야 연구 가능성에 대한 평가, JLab과 영국 Teraview사 공동연구 결과

III. 테라헤르츠 자유전자레이저

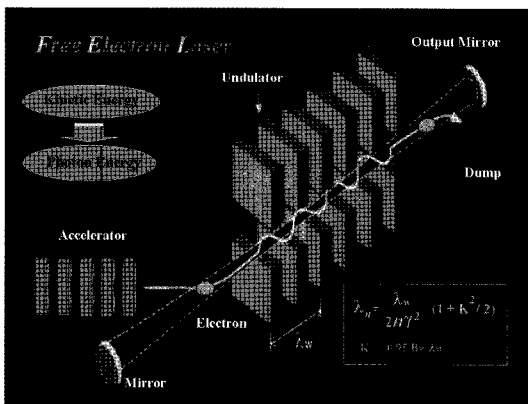
레이저에서 나오는 빛의 색은 하나이고 퍼지지 않는다. 그리고, 다른 광원과 비교해서 훨씬 강하다. 그러나, 일반적으로 레이저는 모든 색을 마음대로 골라서 발생시킬 수는 없다. 그래서 레이저는 종류마다 고유한 색이나 색의 영역을 가지게 된다. 지금까지 이름도 일일이 기억하기 힘든 수많은 종류의 레이저가 개발되었고, 현재도 개발되고 있다.

자유전자레이저는 이제까지의 레이저와 구별되는 새로운 특성이 있다. 그것은 어떠한 색의 빛도 마음대로 선택할 수 있다는 점이다. 특히, 이제까지의 레이저가 빛을 내기 어려웠던 적외선~원적외선(테라헤르츠영역)과 자외선~X-선은 자유전자레이저가 가장 제격인 파장 영역이다. 물론, 한 대의 자유전자레이저가 테라헤르츠 파에서부터 X-선까지 모든 파장 영역을 낼 수 있는 것은 아니고, 사용하는 전자가속기의 에너지 범위에 따라 테라헤르츠파, 적외선, 가시광선, 자외선, X-선 등의 대역에서 레이저 빛을 내게

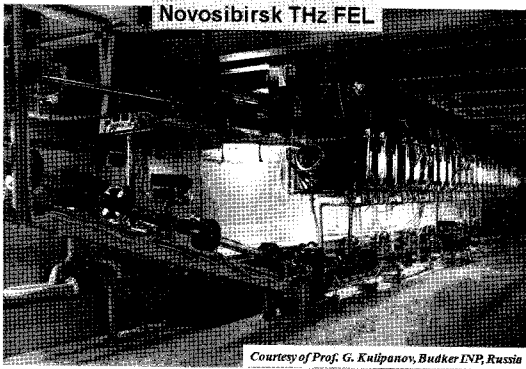
된다. 이와 같이 자유전자레이저의 파장은 전자빔의 에너지에 따라 크게 달라진다. 자유전자레이저에 사용되는 가속기의 종류는 정전가속기, 고주파 선형가속기, 마이크로트론, 전자저장링(electron storage ring) 등 다양하며, 가속기의 종류에 따라 전자빔의 에너지 범위가 달라지고 따라서 자유전자레이저의 파장도 달라진다. 자유전자레이저는 또, 종래의 레이저에 비하여 출력을 대단히 크게 할 수 있고 에너지 변환효율이 높은 장점도 있다. 그리고 종래의 레이저에서와 같은 매질의 열화현상이 없어 수명이 길고, 연속 운전이 가능하다.

자유전자레이저는 일찍부터 테라헤르츠파 대역의 가장 이상적인 광원으로 인정받고 있는데, 그 이유는 다른 광원에 비하여 출력 강도가 최소 수 백 배에서 수 만 배에 이를 정도로 강하고, 분광 특성이 우수하며 자유롭게 파장을 선택할 수 있다는 점 등 때문이다. 하지만 자유전자레이저는 개발비용과 기술의 난이도가 높고 장치의 크기가 거대하여 많이 개발되지 못한 단점이 있었다. 현재 전 세계적으로 미국, 유럽(네덜란드, 독일, 프랑스, 이탈리아), 러시아, 일본, 중국, 그리고 우리나라 등에서 약 10여개의 테라헤르츠 자유전자레이저 장치가 가동되고 있다.

전 세계적으로 몇 가지 유형의 테라헤르츠 자유전자레이저가 개발되었거나 개발되고 있다. 가장 먼저 개발된 것은 다양한 이용자들에게 강력하고 우수한 특성의 테라헤르츠 빔을 제공하는 이용자 시설(user facility)이다. 그리고, 테라헤르츠 영역의 광화학반응, 새로운 물질의 생산, 고부가가치 재료 처리 등의 역할을 담당할 평균 출력이 400 W에 이르는 고출력 테라헤르츠 자유전자레이저가 개발 실증되었다. 그 대표적인 것이 <그림 7>에 나타나있는 러시아 부드러운



<그림 6> 자유전자레이저의 작동 원리. 가속기에서 발생된 고에너지 전자빔을 주기적인 자기장 구조인 undulator (또는 wiggler)에 입사하여 사행운동을 일으켜서 레이저빔을 발생시킨다



〈그림 7〉 러시아 노보시비르스크의
부드커핵물리연구소의 고출력 테라헤르츠
자유전자레이저 장치

리연구소의 NovoFEL이다.

마지막으로 최근 개발이 활성화되고 있는 소형 테라헤르츠 자유전자레이저이다. 보안검색 및 의료 현장에서 사용이 가능한 수 W급 이상의 평균 출력을 가지면서도 장치의 크기가 탁상형 수준인 장치이다. 현재에는 미국을 중심으로 비밀리에 군사용으로 개발되고 있다. 한국원자력연구원에서도 소형 테라헤르츠 자유전자레이저 분야에서는 약 10여년전부터 연구개발에 착수하여 기반 기술을 확보하였고 우수한 성과를 내고 있다.

가장 먼저 개발된 테라헤르츠와 자유전자레이저 이용자 시설은 1980년대 후반에 구축된 UCSB의 테라헤르츠 과학센터이다. 정전형 가속기를 사용하는 이 시스템은 원적외선에서 밀리미터파에 이르는 테라헤르츠 전 영역에서 동작한다. 특히, 테라헤르츠와 펄스초 레이저 등을 결합하여 물성 및 생명공학 연구에 있어서 새로운 지평을 열었다.

이후 유럽연합은 네덜란드에 FELIX 자유전자레이저 연구 시설을 구축하여 최근까지 우수한 성과를 얻고 있다. FELIX 역시 물성, 생명공학 분야에 있어서 우수한 연구 결과를 생산하고 있다. 이들 시스템은 높은 출력밀도를 이용하여 다

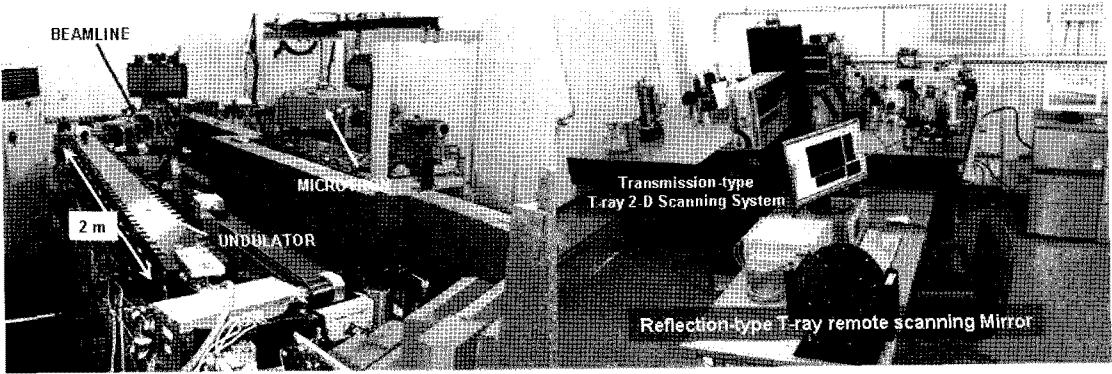
른 테라헤르츠 광원이 보여주지 못하는 우수한 결과를 많이 양산하고 있다. 그 대표적인 것으로 1.5 THz에서 마이오글로빈의 광반응을 처음으로 측정된 UCSB의 결과^[2]와 3.45 THz의 박테리오톱신 진동모드를 이용한 구조변환 측정을 관측한 FELIX의 결과^[3] 등이 있다.

이들은 단순히 주요 생체조직에 대한 분광학 수준을 넘어서서 자유전자레이저의 높은 출력밀도를 이용한 구조 변화와 광반응을 유도할 수 있었다는 면에서 주목을 받았다. 이렇듯 자유전자레이저는 테라헤르츠 영역에서 새로운 물질의 합성 및 생산 등의 역할을 담당할 수 있는 유일한 고출력 광원이다.

고출력 테라헤르츠 광원의 새로운 가능성을 보인 러시아 부드커핵물리연구소의 NovoFEL은 1~3 THz 영역에서 평균출력 400 W를 달성하였다^[4]. 상전도 가속기를 사용하는 에너지회수형 시스템으로 1단계에서 테라헤르츠의 고출력 자유전자레이저빔을 발생하고 2단계에서는 에너지를 높여서 적외선 영역으로 파장을 확장한다. 이 강력한 발생장치는 테라헤르츠 분광학 등 탐구의 도구에서 벗어나 광반응이나 물성개질, 새로운 재료 생산 등 에너지를 직접 이용하는 적극적인 활용이 가능함을 보여주었다. 그리고, 최근에는 상온에서 동작하는 마이크로볼로미터 평면 어레이를 사용하여 초당 90 프레임의 테라헤르츠 실시간 영상을 실현하기도 하였다.

IV. 한국원자력연구원의 소형 테라헤르츠 자유전자레이저 기술

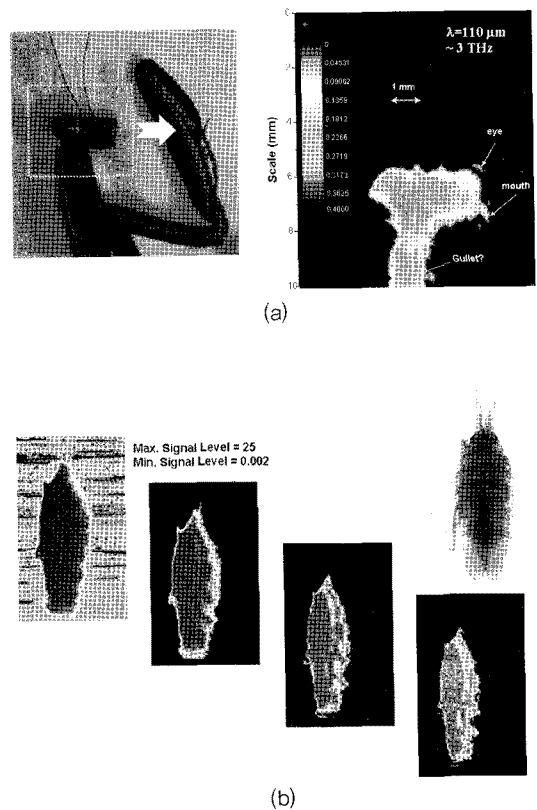
보안검색이나 의료 현장에서 실시간 검색이나 영상에 필요한 테라헤르츠 평균 출력은 약 1



〈그림 8〉 한국원자력연구원에서 개발한 소형 테라헤르츠파 자유전자레이저(좌) 장치와 이를 이용하는 응용연구 실험장치(우)

W 이상으로 추정된다. 현재의 기술로 테라헤르츠 전 영역에서 이러한 세기의 출력을 발생시킬 수 있는 광원이 자유전자레이저이다. 하지만 현장에서 사용할 수 있는 수준의 탁상형 크기와 높지 않은 개발비를 실현하는 문제는 여전히 숙제로 남아 있었다. 한국원자력연구원에서는 이러한 문제점에 주목하여, 소형 마이크로트론 가속기를 이용하여, 기존 장치보다 크기를 대폭 줄인 소형 테라헤르츠파 자유전자레이저 개발에 성공하였다^[6]. 한국원자력연구원에서는 소형인 마이크로트론 가속기를 선택하였다. 그리고, 가속기의 크기와 가격에 큰 영향을 미치는 고주파발생장치에 있어서는 저가이며 소형인 마그네트론을 사용하였다. 이 자유전자레이저는 그 크기가 불과 2×3 m² 정도이며, 100~300 마이크로미터의 아주 넓은 파장대역에서 레이저를 발생시킬 수 있다.

한국원자력연구원에서는 강력한 테라헤르츠를 이용하여 다양한 응용 연구를 수행하였다. 테라헤르츠 대역에서 물성 분석, 분광학연구, 표면 물리, 이미징 연구 등을 수행하였다^[6]. 그리고, 고효율 테라헤르츠파 자유전자레이저를 활용하여 다른 저출력의 광원이 접근하지 못하는 새로



〈그림 9〉 한국원자력연구원의 테라헤르츠파 자유전자레이저로 촬영한, (a) 살아있는 조건의 사마귀와, (b) 바다 갯벌레 테라헤르츠파 투과 이미지

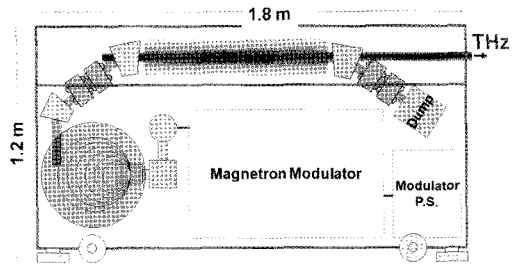
운 응용분야를 개척하였다. 예를 들면 특정 효소의 경우 테라헤르츠빔을 조사하면 광화학반응으로 합성될 수 있음을 확인하였다.

테라헤르츠파는 물에 대한 높은 흡수로 인해서 여러 가지 응용에 제한이 있다. 이제까지 이루어진 테라헤르츠 이미징은 건조 상태의 생체나 아주 얇게 자른 시편에 대해서 행해졌다. 특히, 3 THz 영역은 물의 흡수가 가장 심각한 대역이다. 한국원자력연구원에서는 건조하지 않은 살아있는 조건의 생체에 대해서 테라헤르츠 투과 이미징 연구를 수행하였다^[6]. <그림 9>는 한국원자력연구원의 3 THz 레이저빔을 이용하여 촬영한, 사마귀와 바다 벌레의 생체투과사진이다. 앞으로 많은 기술개발이 이루어져야 할 것이지만, 살아있는 조건의 테라헤르츠 투과영상을 처음으로 얻었다는 점에서 의미를 찾을 수 있다.

한국원자력연구원에서는 최근 개발된 기술을 바탕으로 공항, 항만, 병원 등에서 사용할 수 있는 소형의 탁상형 자유전자레이저 장치 개념 설계를 수행하고 있다. 이러한 장치는 미국 등에서 국방용으로 개발되고 있으며, 러시아, 일본 등

서도 최근 기술개발이 이루어지고 있다. 테라헤르츠 산업 분야의 성장과 함께 이러한 소형 자유전자레이저 장치의 수요가 점차 높아질 것으로 기대를 모으고 있다.

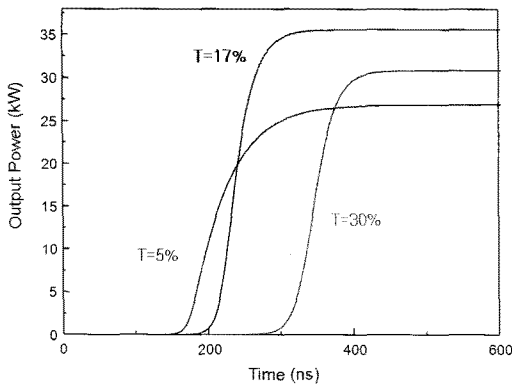
한국원자력연구원에서 처음 개발된 소형 마이크로트론 테라헤르츠 자유전자레이저는 다른 자유전자레이저에 비해서 소형화에 유리한 기술이다. 테라헤르츠 자유전자레이저를 소형화하는데



(a)



(b)



<그림 10> 4 MeV 마이크로트론 전자빔을 2.4 cm 주기, 총 길이 60 cm 길이의 교번자장기에 주입하였을 때의 자유전자레이저 발진 출력 3차원 시뮬레이션 결과

<그림 11> (a) 소형 테라헤르츠 자유전자레이저 장치의 개념도, (b) 공항 테라헤르츠 검색 기술의 활용 도식도

있어서 가장 어려운 점은 소형 가속기를 이용해서 소형의 교번자장기(undulator 또는 wiggler)와 공진기(oscillator)에서 레이저 발진을 얻어야 한다는 점이다. 테라헤르츠의 긴 파장으로 인한 회절은 공진기 내에서의 손실과 함께 전자빔과의 효과적인 상호작용을 방해한다. 이러한 이유들로 인해서 일반적으로는 소형 가속기와 소형 공진기의 조합은 어렵다는 것이 잘 알려진 사실이다. 우리연구팀은 최근 이러한 어려움을 극복하는 방안을 개발하였으며, <그림 10>과 같이 50cm 의 소형 가속기와 60cm의 교번자장기와 공진기를 이용해서도 충분한 세기의 레이저 발진이 가능하다는 점을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

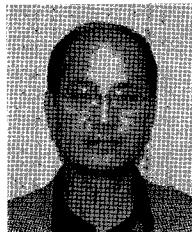
이 경우 전체 자유전자레이저 시스템의 크기는 <그림 11>과 같이 길이 2 m 이내가 되며, 폭과 높이가 작아서 전체적으로 탁상 형태나 이동형 선반 형태로 제작이 가능해진다. 이러한 소형 시스템은 공항, 항만, 주요 건물이나 시설에서 현장 설치나 이동이 가능하므로 테라헤르츠 보안 검색 기술을 실용화하는데 활용될 수 있을 것으로 기대를 하고 있다.

참고문헌

[1] G. L. Carr, et al., Nature 420, 153 (2002).
 [2] R. H. Austin, et al., Phys. Rev. Lett. 62, 1912 (1989).
 [3] A. Xie, et al., Phys. Rev. Lett. 88, 018102 (2002).
 [4] N. A. Gavrilov, et al., Nucl. Instr. Meth. A 575 54 (2007).

[5] Y. U. Jeong et al., Nucl. Instr. Meth. A 475, 47 (2001).
 [6] Y. U. Jeong et al., Nucl. Instr. Meth. A 575, 58 (2007)

저자소개



정영욱

1987년 2월 서울대학교 물리학과 학사
 1990년 2월 카이스트 물리학과 석사
 1993년 2월 카이스트 물리학과 박사
 1994년 1월 ~ 현재 한국원자력연구원 책임연구원
 2008년 5월 ~ 2008년 8월 일본 교토대학교 초빙교수
 2008년 3월 ~ 현재 과학기술연합대학원대학교 겸임교수

주관심 분야 : 테라헤르츠, 자유전자레이저, 레이저 가속