

테라헤르츠 측정과 표준

서호성 | 유한영

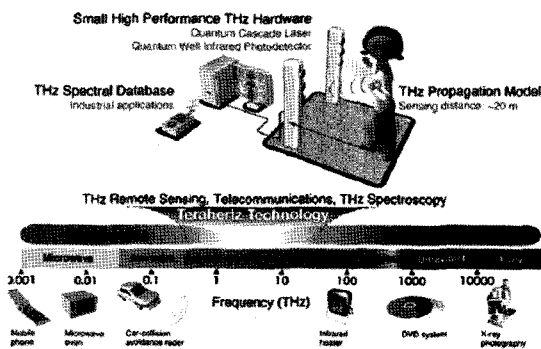
한국표준과학연구원

요약

본고에서는 현재 범세계적으로 추진되고 있는 여러 종류의 표준화에 대해 이해하고, THz파 기술분야의 표준화 현황에 대해 알아 본다. 또, 물리량의 측정 중에 가장 기본이 되는 THz-주파수 영역에서 절대주파수 측정기술과 테라헤르츠 주파수 영역에서 눈금자 역할을 하게 될 표준 광원의 발생 기술에 대해 알아 본다.

I. 서론

테라헤르츠파는 테라(T, 10^{12})라는 접두어가 나타내듯이 주파수가 10^{12} Hz(파장 0.3 mm) 근방에 존재하는 파장으로 원적외선 보다는 길고 마이크로파 보다는 짧은 파장의 전자기파이다. (그림 1 참고)



(그림 1) THz 기술과 그 응용의 예

마이크로파나 빛이 투과할 수 없는 물질을 THz파는 쉽게 투과하고 수분에 잘 흡수되는 특성을 가지고 있기 때문에 의료, 의학 및 바이오, 농업 및 식품공학, 공해감시 및 보안 검색, 환경계측, 재료, 구조물의 비파괴 검사 등의 다양한 산업에 점차 그 응용 범위와 분야가 크게 확장되고 있는 등 그 중요성이 날로 증대되고 있다.

THz 기술에 대한 다양한 연구가 진행되어 테라헤르츠 산업이 활성화될 머지않은 장래에는, 그 THz 관련 측정의 정확도와 신뢰도를 확보하기 위해서는 측정표준과 측정소급성의 보급이 요구될 것이다. 아울러, 각종 규격의 표준화에 대한 요구도 증가할 것이다.

본고에서는 표준화에 대해 이해하고 THz파 기술분야에 어떻게 적용되고 있는지에 대해 논의해 본다. 또한, 현재 연구하고 있는 물리량의 측정 중에 가장 기본이 되는 THz-주파수 영역에서 주파수 절대측정기술과 테라헤르츠 주파수 영역에서의 파장 표준광원의 생성에 대해 기술하고자 한다.

II. 표준화와 THz 기술

1995년 세계무역기구가 창설된 이후에 세계 각국에서는, 자유무역을 촉진하고 시장의 접근성을 용이하게 할 뿐만 아니라 기술무역장벽을 낮추기 위하여 표준과 규정을 표준화하는 적합성평가 제도를 도입하고 국제상호인정협정(MRA) 또는 다자간 상호인정협정(MLA)을 맺는 등의 표준화를 위한 활동이 강화되고 있다. (그림 2)는 이들 국제적 표준화를

위한 6개 추진 분야에 대하여 간단히 정리해 놓은 개략도이다.



(그림 2) 3대 표준과 적합성평가 및 상호인정제도

(그림 2)에서 보는 바와 같이, 표준에는 측정표준, 성문표준(규격표준) 및 참조표준(데이터 표준)이 있다.

측정표준은 국제단위계의 7개 기본단위(m, kg, s, A, K, cd, mol)을 바탕으로 하는 계측활동을 위한 표준이며, 성문표준이란 ISO, IEC와 같은 국제표준화 기구들이 만든 표준화된 산업규격 즉, 규격표준을 말한다.

참조표준이란 측정 데이터나 과학기술정보의 정확도와 신뢰도를 과학적으로 분석 평가하여 공인함으로써 국가사회에 널리 지속적으로 사용할 수 있도록 마련된 표준데이터 자료를 말한다.

한편, 통일되지 않은 도량형 단위를 사용함으로써 인하여 생기는 혼란을 없애고 상거래의 질서와 편익을 위해 세계의 모든 나라에서는 국제단위계를 기본으로 하는 공통의 단위들을 사용하도록 법으로 정해 놓은 법정계량이 있다.

한번 생산하여, 한번 시험·인증하면, 세계 어디에서나 유통이 될 수 있도록 한다는(One Product and One Testing, Worldwide Acceptance of the Products) 슬로건 아래서 추진되는 적합성 평가제도는 ILAC(국제시험소인정기구)을 중심으로 시험소 인정제도, IAF(국제인증포럼)을 중심으로 품질경영시스템 인정 및 제품인증제도가 운영되고 있다.

정보통신산업에서는 시스템 규격이나 프로토콜에 대한 표준화가 급박하게 추진되고 있어서, 국제적인 적합성평가 제도를 운영하는 국제기구나 다자간 상호인정제도는 체계화되지 않아, 현재 양 국가의 정부조직 간의 상호인정협정이

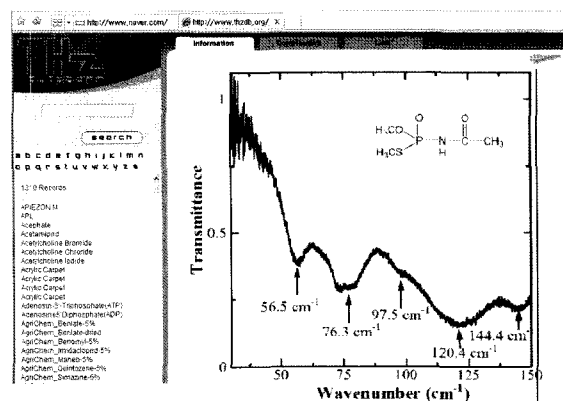
추진되고 있다. 한-미, 한-캐 및 한-베 과의 APEC-TEL MRA(아태경제협력체-정보통신분야 상호인정협정)체결이 그것이다.

THz 기술 분야에서의 국제적 표준화 활동은 아직은 미미하다. 다만, THz 통신에 관련된 표준화 활동의 움직임이 보이고 있는데, 그중 THz-WPAN (Wireless Personal Area Network) 분야의 표준은 IEEE P802.15 워킹그룹에서 Interesting Group으로 인텔이 주도로 추진 중에 있는 실정이다.

THz 기술의 정보·통신이나 의료 분야에의 활용이나, THz의 U-헬스 산업의 활성화를 위해서는 필수적인 요건으로서, 표준과 표준화 활동이 다른 산업 분야에서와 마찬가지로 체계적으로 조직되고 추진되어야 할 것이다.

THz 기술을 발전·전개 시키려면 무엇보다도 먼저 다양한 소재나 재료에 대한 THz 물성데이터베이스를 구축하여야 한다. 이 물성 데이터가 새로운 다양한 THz 산업을 확대하고 신기술, 신물질, 신공법 등 새로운 기술혁신을 가져올 수가 있기 때문이다.

또한, THz 파의 전자 환경 양립성(EMC)에 관한 검토[2]와 더불어, 시험인증과 관련한 적합성평가 제도와 상호인정제도를 구축하는 것도 검토하여야 할 것이다.



(그림 3) RIKEN이 세계 최초로 공개 운영하는 THz물성 DB[1]

1. THz 계측학에서의 핵심측정기술과 측정표준

인체를 비롯한 생체 소재, 화학 및 생화학 물질과 각종 소재 등 방대한 소재들의 THz 물성 데이터베이스 구축을 위해서는 측정의 정확도와 신뢰성을 확보해야 하고 측정표준에

소급성을 갖는 체계 하에서 사용하는 측정기기들은 교정되어야 한다.

그러므로, THz-신산업의 초기부터 관련 측정량의 측정표준의 확립과 측정표준소급체계 구축이 필요하다.

THz 파의 활용분야에 따라 인체를 비롯한 생체 조직의 의료, 진단을 위한 분광시스템의 사용주파수와 영상장치의 주파수에 대한 표준규격이 요구될 것이며, 근거리 무선통신용으로 확장할 경우 통신용 주파수에 대한 신호원 표준광원 및 절대 주파수 측정 시스템 등이 필요하게 되어 이에 대한 측정표준이 요구된다.

또한 고출력 THz 파를 사용하여 영상 시스템을 고급화하고 응용범위를 확장하게 되면 THz 파의 출력에 대한 표준이 필요하게 될 것이다. 그러므로, THz 영역에서의 핵심측정요소기술로서는

- (1) 표준 신호용 THz 광원
- (2) 절대주파수 측정시스템
- (3) 정밀분광용 THz 전자파 합성기
- (4) 연속-THz파 및 펄스형 THz파의 출력 또는 에너지 측정

등의 실현을 위해 다양한 관점에서 검토하는 것이 필요하다.

THz 주파수 대역에서는 지금까지 범용적인 기술이 확립되지 않았기 때문에 이들 측정표준 역시, 아직 확립되지 않은 상태이다. 그러나 미국 NIST, 일본 NMIJ, 독일 PTB[3], 영국의 NPL등의 국가 측정표준연구기관에서는 THz 출력 및 주파수 표준에 대한 연구개발을 시작하고 있으며, 향후 THz 계측기술의 국제경쟁력 향상을 위해 우리나라에서도 산업계의 요구에 유연하게 대응할 수 있는 THz 대역의 주파수 측정표준, 출력 및 에너지 측정표준에 대한 조기 구축이 요망된다.

2. 광주파수 빔을 이용한 THz-주파수측정

1) 광주파수 빔을 이용한 광주파수 측정원리

1990년대, 펨토초 레이저가 개발된 이후, 펨토초 레이저 펄스의 반복률과 위상을 원자시계의 주파수로 위상제어할 수 있는 기술이 개발됨에 따라서 마이크로파와 광파 사이를 위상 결맞(coherent)는 연결이 가능하게 되었다. 그 결과, 종

전의 복잡하고 거대한 장치들로 이루어진 레이저 광주파수 절대측정 장치인 주파수합성체인을 대신하는 비교적 간단한 시스템으로 광주파수를 더 높은 정확도로 절대 측정할 수 있는 길이 열렸다.[4]

이 연구 성과가 기초 물리학에 미치는 영향을 고려하여, 2005년 J. Hall 과 T. Hänsch에게 노벨물리학상이 주어졌다. 광주파수 측정기술(optical frequency metrology)은 현대과학의 모든 측정기술 중에서 가장 높은 측정분해능과 측정정확도를 갖는다. 이를 기반으로, 기초 물리학은 물론 국제측정표준의 핵심 결정체인 국제단위계(SI, international system of units)의 발전에 가장 중추적 역할을 하고 있다.

펨토초 레이저는 시간 영역에서는 주기(τ)적인 펄스의 강도함수인 델타함수시리즈로 나타나는데, 이것은 시간영역에서 보면 머리를 빗는 빗과 같은 모양을 갖는다.(시간영역에서 델타함수)

이것을 푸리에 변환을 하면, 주파수 영역에서도 일정한 간격($f_{rep} = 1/\tau$)을 갖고 주기적으로 나타나는 불연속 스펙트럼이 된다. 이 역시 빗과 같은 모양의 함수 꼴인 델타함수시리즈로 나타나고, 이것을 광주파수 빔(Optical Frequency Comb)이라고 한다. 즉, 펨토초 레이저의 주파수 영역에서의 스펙트럼을 광주파수 빔이라고 하는 것이다. (그림 4 참고)

펨토초 레이저의 펄스 반복률과 펄스 위상을 수소메이저나 세슘원자시계의 표준주파수를 이용하여 안정화 하고, 그 푸리에 변환인 광주파수 빔 스펙트럼을 관찰하면, 빔의 광주파수 스펙트럼 상 나타나는 각 모드의 주파수, f_m 는

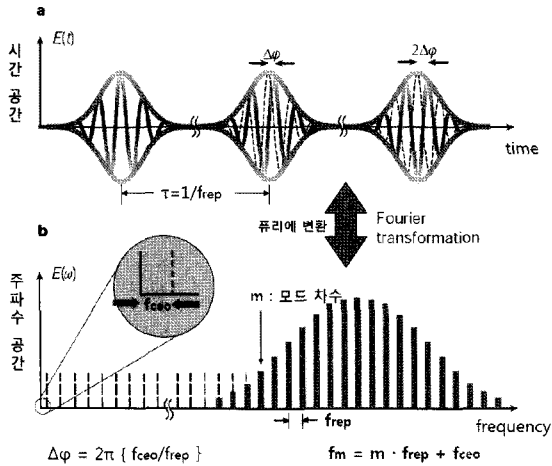
$$f_m = m \cdot f_{rep} + f_{ceo} \quad [1]$$

와 같이 주어진다.

여기서, m 은 모드 번호이고, f_{rep} 및 f_{ceo} 은 각각 펄스 반복률과 주파수오프셋(carrier envelop offset)주파수라고 부르는 값이다. 여기서, f_{ceo} 은 (그림 3 a)에서 보는 바와 같이, 펨토초 레이저 펄스 내부의 반송파(carrier) 신호인 광파 신호의 위상과 각 펄스의 포락선 사이의 위상 편이량의 차이 때문에 생기는 양이다.

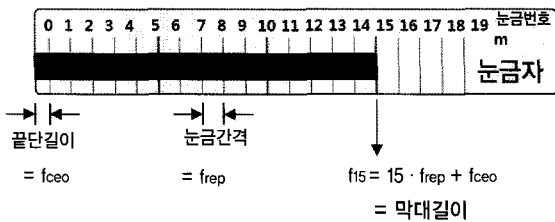
(그림 5)와 같이 눈금자와 비교하여 설명하면, f_{ceo} 은 눈금자의 끝단 길이와 같이, 광주파수 빔의 끝단의 주파수 값이 되는 것이다.(그림 4b 참고)

눈금자에서 눈금의 간격과 끝단의 길이를 알면 막대의 길이를 잴 수가 있듯이, 이 레이저 광빔을 이용하면 피측정 레이저의 주파수를 잴 수가 있다.



(그림 4) 펨토초 레이저 펄스와 그 푸리에 변환인 광주파수 빔 a) 시간 공간 b) 주파수 공간에서의 스펙트럼

$f_{rep} = 1/\tau$ 는 광주파수 공간에서 빛 모드 들사이의 간격이고, $\Delta\varphi$ 는 각 펄스 안에 있는 반송파 신호들 간의 위상차이며, $f_{ceo} = \varphi \cdot f_{rep}/2\pi$ 는 위상차 $\Delta\varphi$ 에 기인한 주파수 빔 성분의 주파수 오프셋 값이다. 이때 m 번째 광주파수 빛 모드의 주파수는 $f_m = m \cdot f_{rep} + f_{ceo}$ 로 주어지며, f_{rep} 와 f_{ceo} 모두 마이크로파 영역의 주파수 값에 속하므로 세습 원자시계 또는 수소메이저의 표준주파수 신호로 측정과 안정화가 가능하다.



(그림 5) 눈금자와 광주파수 빔의 유사성

그러므로, 피측정 레이저의 절대주파수 값을 정확하게 측정하고자 하면, 펨토초 레이저의 반복률 f_{rep} 와 펄스 위상

f_{ceo} 를 일정하게 유지시키고, 즉, 자의 눈금간격을 일정하게 갖고 막대 길이를 재듯이, 측정을 하면 될 것이다.

(그림 5)에서는 다행히 막대 길이와 15번째 눈금이 일치하였기 때문에 간단하게 막대 길이는 $f_{15}(\text{막대길이}) = 15 \cdot f_{rep} + f_{ceo}$ 가 되는 것을 알 수가 있다. 막대 길이가 15번 눈금보다 조금 길 경우에는 그 차이(Δf)만큼을 더해 주면 된다. 광에서는 빛 모드(눈금)와 피측정 레이저 주파수(막대 길이)사이의 이 약간의 차이는 맥놀이(beat) 주파수(f_b)를 측정함으로써 알 수가 있다.

즉, $\Delta f = f_b$ 이 된다. 그러므로, 피측정 레이저의 주파수 f 는

$$f = f_m + f_b = m \cdot f_{rep} + f_{ceo} + f_b \quad [2]$$

가 된다.

2) 펄스 반복률 f_{rep} 와 펄스위상 f_{ceo} 의 안정화법

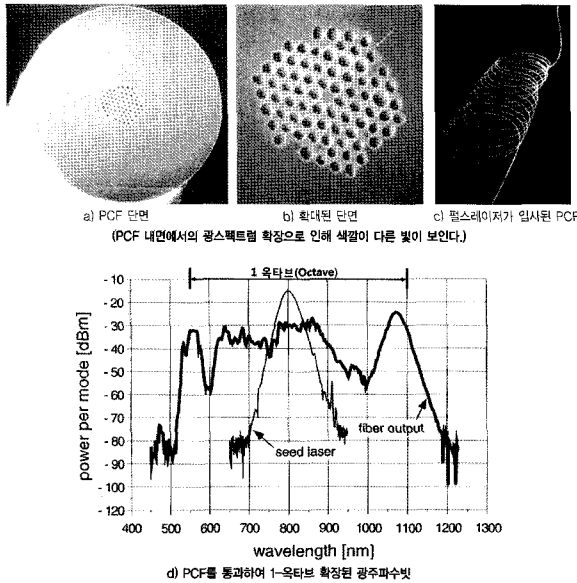
식 [2]의 값을 정확하게 결정하기 위해서는 m , f_{rep} , f_{ceo} 및 f_b 값 들을 정확하게 측정하면 된다. 그러므로 f_{rep} , f_{ceo} 를 안정화 시켜 일정하게 유지해야 하며, 정확한 모드 번호인 정수 m 값과 맥놀이 주파수 f_b 값을 정확하게 측정해야 한다.

f_{rep} 를 안정화시키기 위해서는 레이저 펄스신호의 일부를 고속광 검출기에 입사시키면, 광주파수 빛의 여러 모드들 사이의 맥놀이 주파수가 광전류 신호로 검출된다. 이 맥놀이 신호의 주파수가 펄스 반복률과 같으므로, 이 신호 주파수가 일정하도록 표준 주파수 신호로 이용하여 위상제어 함으로서 f_{rep} 안정화가 가능하다. 이 맥놀이 신호는 레이저 공진기 길이($f_{rep} = c/2nL$, 여기서, c : 빛속도, n : 펄스 레이저 매질의 굴절률, L : 레이저 공진기 길이)에 비례하므로 제어 신호는 공진기에 부착된 압전소자의 길이를 제어함으로써 f_{rep} 안정화가 가능하다.

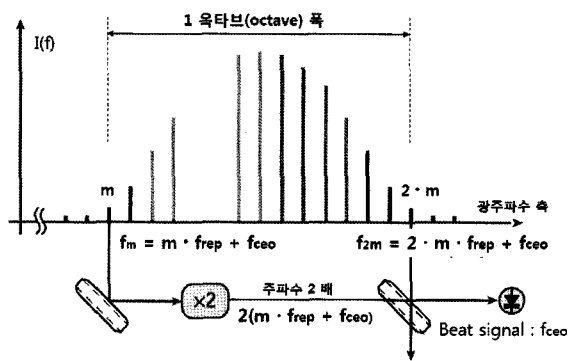
한편, f_{ceo} 를 안정화 시키기 위해서는 $f-2f$ 간섭계를 사용하는 방법이 이용된다. (그림 6)에서 보는 바와 같이 펨토초 레이저 펄스를 비선형특성이 강한 광결정섬유 (PCF, photonic crystal fiber)에 통과 시키면, 광빔 스펙트럼은 (그림 6의 c)에서 보는 바와 같이 1-옥타브 이상 확장되어 무지개 색 스펙트럼이 관측된다.

PCF 출력 단에서 1 옥타브 이상 확장된 광빔 스펙트럼 중에 m 차 모드 주파수 f_m 을 2차 조화파 발생결정(SGH,

Second Harmonic Crystal)을 이용하여 2 배로 만들고, 2·m 차 모드의 주파수 f_{2m} 과의 차이 (그림 7)에서 그림 아래 부분이 마이켈슨 간섭계와 비슷하고 각 팔의 입사 주파수가 각각 f_m, f_{2m} 이므로, (f-2f 간섭계라 부른다) Δ 는 다음과 같이 된다.



(그림 6) 광결정섬유(PCF)와 광주파수 빛 스펙트럼 확장



(그림 7) 확장된 광빛 스펙트럼과 1-2f 간섭계 및 fceo신호 검출

$$\Delta = 2 \cdot f_m - f_{2m} = 2 \cdot (m \cdot f_{rep} + f_{ceo}) - (2m \cdot f_{rep} + f_{ceo}) = f_{ceo} \quad [3]$$

Δ 를 측정하기 위해서 (그림 7)에서와 같이 이들 사이의 주파수 차이인 맥놀이 신호를 검출한다.

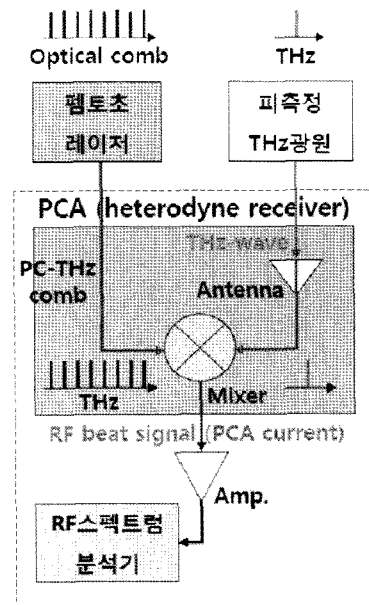
이 맥놀이 신호의 주파수는 식 [3]와 같이 $\Delta = f_{ceo}$ 가 되고, 이 신호의 주파수를 원자시계의 표준주파수 신호와 위상 동기 함으로서 안정화가 가능하다. 그리고, f_{ceo} 는 레이저 매질의 균속도분산에 비례하는데 이 값은 펄스 레이저의 펄스 레이저 출력에 영향을 받기 때문에 이 출력을 제어함으로써 안정화가 가능하다.

이것으로 안정적인 f_{rep}, f_{ceo} 및 f_b 를 측정할 수가 있고, 이 값 들로부터 식[2]를 이용한 피측정 레이저의 주파수를 절대 측정할 수가 있다. 이것이 레이저 광 빛을 이용한 광주파수 절대 측정의 원리이다.

3. THz-주파수 빛을 이용한 THz파 주파수 측정원리

지금까지 펄스 레이저의 광주파수 빛의 원리와 피측정 레이저광 주파수의 절대측정의 원리에 대해서 살펴보았다.

이와 같은 원리에 입각하여, 광주파수 빛의 주파수 대역을 THz 주파수 대역으로 다운 컨버전한 THz 주파수 빛을 이용하면, sub-THz 부터 THz 까지의 주파수 측정이 가능하다.[5,6]



(그림 8) THz-스펙트럼분석기 구조도

1) 광주파수 빛의 THz-PC 빛으로의 다운 컨버전

지금까지 미답의 주파수 영역인 THz 주파수 측정에 관해

서는 전기적 방법(헤테로다인법 등)이나 광학적인 방법(간섭계 등)으로 접근하는 것이 가능하였으나, 높은 주파수 정확도를 갖는 측정방법은 아직까지 확립된 바가 없었다. 다만, 1장에서 기술하였듯이 주파수 합성체인을 이용하면 THz의 주파수 측정도 가능하나 실제적으로 이를 이용하여 THz 주파수 측정을 수행한 적은 없었다. 모드 동기된 타이타늄-사파이어 펄스 레이저에서 나오는 고 반복률의 초단펄스 광의 주파수 영역에서의 스펙트럼을 광주파수 빔이라고 부른다는 이야기 이미 하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 이 광 빔의 모드들을 광 주파수 축에 있어서 정확한 자준급으로 이용하는 것이 가능하다. 가시 또는 적외선 영역에 있어서의 광 빔을 이용한 광주파수 측정의 원리를 THz 영역에서의 주파수의 절대측정에 적용이 가능하다.

이 광 빔을 THz 검출용 광전도안테나(PCA)에 입사하면 PCA의 초광대역 복조 효과에 의해 광 빔 스펙트럼의 각 모드 사이의 주파수 차이 값들이 들이 THz 영역까지 다운컨버전이 되어 광여기 전류-주파수 빔이 PCA 내에 생성이 된다.(PC-THz comb, 그림 8 참고)

PC-THz comb은 광대역의 주파수 선택성, 높은 스펙트럼 순도, 주파수 체배 기능 등의 많은 특징을 갖고 있다. 이것을 초정밀 레이저 제어기술에 이용하여, 고도로 안정화하면 THz 영역에 있어서도 정확한 주파수 기준자로 이용할 수가 있다. PC-THz 빔을 기준으로 하여 CW-THz 광원의 주파수를 실시간으로 관측이 가능한 THz-스펙트럼분석기에 대해서 기술한다.

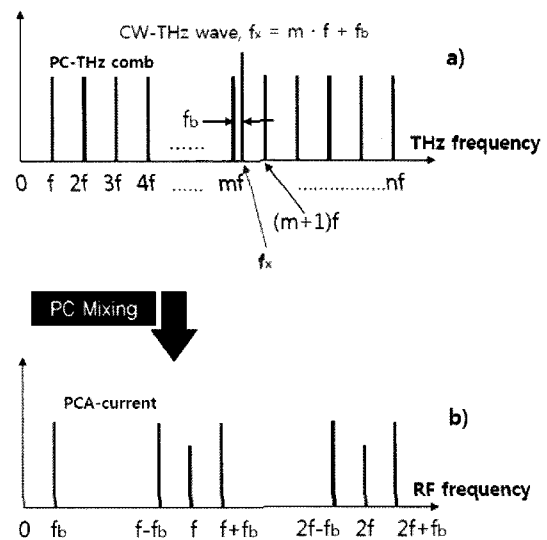
2) THz-스펙트럼분석기의 원리

THz-스펙트럼분석기의 원리는 헤테로다인법을 기본으로 하고 있다. (그림 8 참조)

이전의 전기적 헤테로다인법과는 달리, PC-THz 빔은 복수개의 주파수 발진기를 기준으로 사용하는 것과 같아서 sub-THz ~ THz 영역을 측정할 수 있는 것과 헤테로다인 검출기로서는 PCA를 이용하는 것에 의해 실온에서의 고감도 THz 검출이 가능하다는 점이다. PCA에서 합성된 PC-THz 빔과 CW-THz파는 RF대역에서의 맥놀이 신호를 만들고 이것이 전류-전압 변환앰프에서 변환 증폭된 후 RF-스펙트럼분석기로 관측된다. (그림 9)에는 그 측정 원리를 나타내었다. 펄스 초 레이저 광(펄스반복률 $f_{rep} = f$)를 PCA의 gap 에 집광하

면, 광전도막(저온성장 GaAs박막) 가운데에서 PC-THz 빔이 생성된다.(그림 9. (a))

이와 같은 PC-THz 빔이 생성된 PCA에, 피측정 CW-THz파를 입사시키면, 광전도 합성과정을 통하여 PC-THz 빔과 피측정 CW-THz파 사이의 맥놀이 신호가 RF-대역에서 발생한다. (그림 9. (b))



(그림 9) THz-스펙트럼분석기의 원리도

PC-THz 빔을 구성하는 각 모드의 선포는 충분히 좁아서 고려할 필요가 없기 때문에 이 비트신호를 RF-스펙트럼분석기로 CW-THz파를 간접적으로 측정하는 것이 가능하다. 여기서 최저 차의 맥놀이 신호(주파수 = f_b)는 CW-THz파에 가장 인접한 PC-THz 빔의 comb 모드와의 맥놀이 신호이다. 이 빔 모드의 차수를 m 이라고 하면 CW-THz파의 절대주파수(f_x)는 다음과 같이 주어진다.

$$f_x = m \cdot f \pm f_b \quad [4]$$

f 는 주파수 계수기로, f_b 는 RF-스펙트럼분석기로 측정이 가능하다. 모드의 번호 m 값과, $+f_b$ 혹은 $-f_b$ 를 결정하기 위하여 모드동기 주파수, 즉 펄스 반복률 $f_{rep} = f$ 로 부터 $f + \delta f$ 만큼 변화시키면 비트신호는 f_b 에서 $f_b + \delta f_b$ 로 변하게 된다.

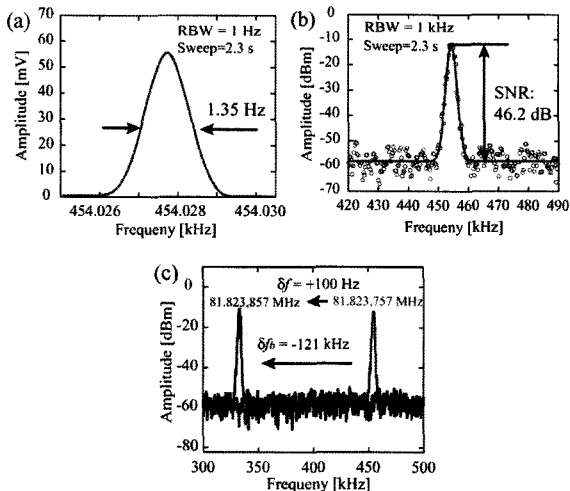
이 때 $m \cdot \delta f$ 와 $-\delta f_b$ 는 같아야 되기 때문에, m 을 다음과 같이 식에서 구할 수 있다.

$$m = -\delta f_b / \delta f \quad [5]$$

최종적으로 m, f 와 δf_b 로 부터 CW-THz파의 절대주파수 값을 구한다.

$$f_x = -(\delta f_b / \delta f) \cdot f \pm f_b \quad [6]$$

S. Yokoyama 등의 연구[4]에 의하면(그림 10 참조), THz-스펙트럼분석기의 CW-THz 테스트광원으로서, Rb-원자시계(정확도: $5 \cdot 10^{-11}$, 안정도: $2 \cdot 10^{-11}$)에 동기된 주파수 합성기로 구동된 주파수체배기(발전주파수 75 ~ 110 GHz, 체배수 : 6, 출력 : 2.5 mW)를 이용하여 만들 100 GHz 대의 THz 파의 주파수측정을 수행한 결과, $m = -\delta f_b / \delta f = -(-121 \text{ kHz} / +100 \text{ Hz}) = 1210$, $f_x = 1210 \cdot 81,823,757 \text{ Hz} + 454,027.976 \text{ Hz} = 99,007,119,997.976 \text{ Hz}$ 로 측정되었다. 측정 주파수 정확도를 error/f_x 로 정의하면, 75 ~ 110 GHz 사이의 평균 정확도는 $2.85 \cdot 10^{-11}$ 이 되었다. 스펙트럼 측정의 S/N 비는 46.2 dB 이었으며, 검출 한계 감도는 약 25 nW로 추정된다.



(그림 10) THz 스펙트럼분석기의 실험결과
 (a) 맥놀이 신호의 선폭 측정
 (b) 맥놀이 신호의 신호 대 잡음비
 (c) 절대주파수 값 결정을 위한 차수 m 결정 실험

(그림 10 a) 및 b)는 최 저차 비트신호(f_b)를 나타내고 있다. (그림 10 a) 에 의하면 선폭은 1.35 Hz 이지만 이것은 RF-스펙트럼분석기의 분해능에 의해 제한되고 있다.

4. 빛 모드의 주입잠금을 이용한 THz주파수 표준광원

THz 주파수 영역에서의 물성의 분광연구나 THz 통신을 위하여 파장가변 고출력 연속레이저가 필요하다. 이를 위한 다양한 방법이나 종류의 THz 광원 연구를 하고 있으며(또, 최근 광대역 파장가변 두 주파수 광원을 photomixer의 THz 방출기에 펌핑하여 발생하는 THz 광원이 유력한 소형화 광원 중에 하나로 기대되고 있다.[8,9]

국·내외적으로 이와 같은 다양한 THz 광원 개발을 위한 연구가 추진되고 있으며, 이들 광원의 주파수 값을 정확히 결정하여 표준 값을 제공하고, 각종 THz 측정기의 주파수 또는 파장 값 교정을 위해서는 THz 주파수 표준광원과 측정 표준 기술이 필요하다.

이를 위해서는 높은 펄스 반복률을 갖는 펄스초 광섬유 레이저로 만들어지는 광주파수 빛의 2 모드를 이용하는 방식이 연구되고 있다.[10] 펄스초 레이저로 만들어지는 광주파수 빛 스펙트럼에서의 각 모드들의 출력은 수십 nW 수준에 불과하기 때문에 이들 사이의 모드 맥놀이를 이용한 photomixer에서의 THz 발생은 거의 불가능하다. 그러므로 이 문제를 해결하기 위하여 연구되는 방식이 광빛 모드의 주입잠금을 이용하는 방식이다. 펄스초 레이저를 이용한 광 빛의 각 모드들을 독립된 광원으로 사용하거나 스펙트럼 상에 1 THz 떨어진 두 개 모드 광원을 이용하여 THz 파를 발생시키기 위해서는, 광빛 광원에서 2 가지의 난제를 해결해야 한다.

첫째, 광빛의 각 모드 간의 간격이 너무 좁아서(~ 수 100 MHz) 단일 모드 선택이 기존의 필터방식(AWG나 소자형 간섭필터 등)으로는 어렵다는 점이다.

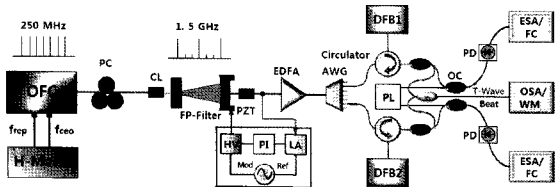
또한, 광빛의 총 모드 출력이 작아서 단일 모드를 선택하더라도 이용하기에는 한 모드의 출력이 너무 작다는 점이다.(10 nW ~ 10 μ W).

둘째, 두 대 레이저의 주파수 차이를 이용한 1 THz 근방의 광맥놀이 신호의 출력을 얻는다 하더라도 원하는 레이저 파장 대역에서 수 THz 주파수의 응답속도를 갖는 초고속 광도전안테나(PCA)를 만들기 쉽지 않은 점이다.[11]

첫 번째 문제를 해결하기 위하여 고려되는 주파수 선택 소자는 Fabry-Perot etalon 필터가 고려되고 있다.[12,13] 연속 발진하는 반도체 레이저(DFB-LD, DBR-LD 등)나 파장가변 공진형 반도체레이저(ECLD)에 선택된 광빔의 주입잠금(injection locking)을 실시하여 106 배 정도로 광출력을 증폭하는 방법이다.[14]

두 번째 문제점을 해결하기 위해서는 넓은 대역폭(> 1 THz)에서 동작하는 광전도 안테나(UTC, PCA)의 제작과 특성평가가 고려되어야 한다.

이와 같이 2 가지 해결 방안을 이용하여 THz 광원 개발을 위해 만들어진 1 THz 간격의 레이저의 개발에 대한 KRISS의 최근 연구결과를 소개한다.



OFC: Optical Frequency Comb, PC: Polarization Controller, CL: Collimation Lens, EDFA: Erbium Doped Amplifier, AWG: Arrayed Waveguide Grating, PL: Probe Laser, OC: coupler, ESA & OSA: RF & Optical Spectrum Analyzer, WM: Wavelength Meter, FC: Frequency Counter

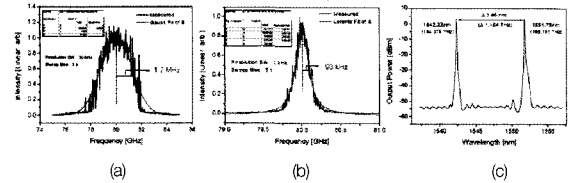
(그림 11) 위상 결맞는 THz 생성을 위한 펄트초 광섬유레이저 광 빔의 DFB 레이저에의 주입잠금 (표준과학연구원)

주입잠금(injection locking)이란, 외부의 주(master) 레이저 광이 종(slave) 레이저 공진기 안으로, 들어가서 종 레이저의 주파수가 주 레이저 주파수에 고정되는 현상을 말한다.

광통신 대역에서 동작하는 DFB-LD나 DBR-LD 등의 반도체 레이저는 주입전류나 온도를 바꿈으로 수십 nm 까지, 중심파장을 가변 할 수가 있고 주입잠금이 일어나는 대역폭은 주입하는 주 레이저의 출력에 비례하지만 보통 수백 MHz에서 수십 GHz 정도의 대역폭을 갖고 있다. 단일 모드로 주입잠금을 하려고 하면 광 주입하는 주 레이저의 주파수도 종 레이저의 주입잠금 대역폭 안에서 단일모드로 동작하여야 한다. 그런데 사용된 최고의 반복률을 갖는 광섬유레이저라 하더라도 250 MHz 정도 밖에 되지 않기 때문에, 주입잠금 대역폭이 500 MHz 정도인 DFB-LD의 주파수 잠금을 위해서는 광주파수 빔에서 단일모드를 선택하여 광 주입

하지 않으면 단일모드로 주입잠금이 불가능하다.

이를 위해 1.5 GHz 간격의 투과대역 주기를 갖는 파브리-페로 에탈론 필터를 설계 제작하여 광주파수 빔 모드 주파수를 1.5 GHz 간격으로 필터링하여, 주입잠금을 위한 주(master) 광빔 모드로 사용한다. (그림 11)에는 실험의 장치도를 나타내었다. 수소메이저(H-Maser)에 펄스 반복률 f_{rep} 및 f_{ceo} 의 주파수가 위상 동기 된 펄트초 광섬유레이저의 각 모드 들은 필터링 반복주기가 각각 1.5 GHz 및 25 GHz를 갖는 FP-에탈론 필터 및 AWG 필터를 이용하였다. 원하는 주파수 차이(1.185 THz)를 갖는 두 모드를 선택하고, 이를 DFB-LD 1 및 DFB-LD 2 에 주입잠금을 하여 각각 (그림 12 c)와 같은 스펙트럼을 얻었다.



(그림 12) 광 빔 모드의 주입 잠금으로 얻어진 두 레이저 스펙트럼
a) 주입잠금 전 b) 주입잠금 후 DFB 레이저 선택맞춤
c) 주입 잠금된 두 DFB 레이저의 광스펙트럼

이와 같은 방법으로 광통신 밴드에서 고안정도의 주파수 안정화된 주파수 차이가 1 THz 인 두 레이저 광원을 얻는다. 이 두 레이저 주파수 신호는 서로 위상동기가 되어 있으므로, 이론적으로는 THz파의 중심 주파수 안정도는 10^{-13} 정도의 수준(주파수기준 수소 메이저)이며 위상 안정도가 1 radian 미만일 것으로 추정하고 있다.

레이저의 선포를 측정한 결과, 주입 잠금 전의 DFB-LD는 ~ 1.7 MHz, 잠금 후에는 93 kHz의 선포(5×10^{-10})을 갖는 것을 확인할 수가 있었다. 주입잠금된 두 대 레이저 광의 스펙트럼선포 측정은 광로 지연된 헤테로다인법(self-heterodyne)을 이용하였다. 선포 측정시스템의 광 지연을 위하여 25 km 단일 모드 광섬유를 사용하였고 주파수 오프셋을 위하여 80 MHz의 광 음향 변조기(AOM)를 사용하였으며 이때 분해능은 ~ 8 kHz 정도가 된다.

주입잠금 후 상대적으로 넓은 선포는 레이저의 내부 잠금이나 주입전류의 요동 등의 요인에 의해 제한을 받는 것으로 생각된다. 그러나 각 모드들은 서로 위상 가간섭을 갖는

것이 알려져 있고, 두 레이저 사이의 맥놀이 선폭은 Hz 미만 일 것으로 알려져 있다[15]. 즉, 개발한 두 대 주입잠금된 DFB-LD 이용하여 PCA를 이용한 THz 발생을 할 경우 Hz 미만의 위상 가간섭성 THz 광원을 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 광통신대역에서 동작하는 THz 주파수에 반응하는 초고속 PCA 가 나오면, 전 파장대역에서 위상 가간섭성 THz 광원 개발을 할 수 있을 것으로 전망한다.

이와 같이 펄초 광섬유레이저 광주파수 빔으로부터 얻을 수 있는 위상 가간섭성 THz 광원은 THz-스펙트럼분광기, THz-파장계 및 기타 측정기의 주파수 표준광원뿐만 아니라 THz 통신의 표준광원으로 활용할 수 있을 것을 기대한다.

III. 정리 및 토론

현재 국제적으로 추진되고 있는 각종 표준화에 대해서 간단히 살펴보고, 앞으로 전개될 미답의 THz 기술에 표준화를 어떻게 적용되는가를 살펴보았다. THz 기술의 표준화를 위하여, THz와 기술을 산업에 널리 보급하고 이용하기 위한 각종 재료나 생체 및 생화학 물질에 대한 THz 분광정보를 포함한 물성데이터베이스 개발 프로그램에 대한 검토가 필요하고 이들을 참조표준화 하기 위하여 생산, 평가 및 표준 등록을 위한 평가 가이드 제정과 데이터센터의 운영에 대해 검토해야 할 것이다.

기본의 THz 물성데이터들을 활용하여, THz 관련 기기나 측정기기, 제품 등 다양한 생산품에 대한 생산이 활성화되는 관련 규격 제정이나 표준화를 위한 검토가 필요하며, 이를 위해 관련 학계, 연구계 및 산업계의 전문가들이 포함된 분야별 기술위원회 운영을 검토할 필요가 있다.

또 THz 산업을 위하여, 각종 물리량이나 파라미터에 대한 측정표준의 확립, 측정표준 소급체계 구축 및 보급에 프로그램이 개발되어야 할 것이다. THz 측정표준을 위하여 계측학에서 중요한 파라미터 중 하나인 THz 주파수의 절대측정법과 광주파수 빔의 주입잠금을 이용한 표준광원개발에 대해서는 기술적인 원리를 살펴보았다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.thz.org/>, 일본 이화학연구소 RIKEN과 정보통신연구기구 NICT가 공동으로 구축한 500여개의 재료의 THz 물성데이터베이스.(2008년 9월 부터 공개 운영하고 있다.)
- [2] 백문철, 강승범, 광민환, 강광용, “테라헤르츠 기술과 헬스 및 센” 전자통신동향분석 제 22권 제 5호 2007년 10월, pp.108~ 20
- [3] Laser Focus World, “The PTB achieves absolute measurement of terahertz radiation”, Wed Sep 24 09:39:00 CDT 2008
- [4] Th. Udem, et al, PRL 82, pp.3568 (1999), T. Udem et al., “Optical frequency metrology,” Nature 416, 233~237 (2002)
- [5] S. Yokoyama et al., “Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb,” Opt. Express 16, 13052~13061 (2008).
- [6] Y. J. Jang, Y. C. Kim, D. C. Seo, D. S. Yee., “Terahertz Frequency and Power measurement Based on THz frequency Comb and a bolometer”, IRMMW-THz 2009, M4C04.0474, Busan, KOREA, 2009.
- [7] 장선호, 이민경, 강관용, Tera-Hertz Wave“, IT SoC Magazine, pp.10 ~ 21, 2005
- [8] R. Czamy, M. et al “Continuous-Wave THz Generation Based on a Dual-frequency Laser and a LTG-InGaAs Photomixer”, IEEE Int. Conference on Microwave Photonics (MWP 06), Oct. 2006
- [9] 박익순, “파장가변 CW THz복사 및 분광응용연구”, 박사학위논문, 다름슈타트대, 2007
- [10] 백문철 등 “밀리미터파와 테라헤르츠-파의 발생기술“, 전자통신동향분석 제 24권 제5호 pp.119~132, 2009년 10월, ETRI (pp.122)
- [11] C. Baker et al., Optics Express 13(23) pp.9639, 14, Nov. 2005
- [12] Science vol. 321, pp.1335, 5 Sep. 2008
- [13] Nature vol. 452, pp.610, 3 Apr. 2008

- [14] S. H. Lee, H. Y. Ryu, H. S. Suh, et al. "펨토초 광섬유 레이저의 광빔 주입 잠금을 이용한 불연속 가변 광주파수 신세사이저," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No.19, pp.1435-1437, 2009
- [15] H. Y. Ryu, S. H. Lee, W. K. Lee, H. S. Moon, H. S. Suh, "광빔주입 잠금 모드를 이용한 아세틸렌레이저의 절대 주파수측정," Optics Express, Vol.16, No.5, pp.2867-2873, 2008.

약 력



서 호 성

1980년 영남대학교 물리학과 학사
 1982년 경북대학교 응용물리 석사
 1994년 영남대학교 물리학과 박사
 1982년 ~ 현재 한국표준과학연구원 길이사시간센터 책임연구원
 관심분야: 광주파수 측정 및 제어 THz파 주파수 측정표준, 광통신 측정표준, 장거리 및 측량 측정표준 등



유 한 영

1998년 배재대학교 물리학과 학사
 2001년 배재대학교 물리학과 석사
 2006년 충남대학교 물리학과 박사
 2006년 ~ 현재 한국표준과학연구원 길이사시간센터 연구원
 관심분야: 광섬유레이저, 광주파수 계측 광통신 측정표준 등

