

고출력 연속형 테라헤르츠파 기술

김정일 · 전석기 · 김근주 ·
김재홍 · 신동원
한국전기연구원

I. 개 요

테라헤르츠파(Terahertz Wave, T-ray)는 전파의 투과성과 광파의 직진성을 모두 가지고 있으면서 세포 구조를 파괴하지 않아 차세대 광원으로 주목 받고 있는 생체 친화형 전자기파이다. 의료, 식품/약품, 국방/보안, 정보통신, 산업 응용 등 우리 삶의 모든 분야에 그 활용이 가능하지만, 지금까지는 테라헤르츠(THz) 파의 발생 및 계측이 어려워 상업적인 응용에 제한이 있었다. 하지만, 초정밀 공정 기술, 재료 기술, 펄초 레이저 기술 등의 발전으로 THz파의 발생 및 계측이 용이해지고 있으며, 현재는 소형 고출력 THz 파 신호원 및 고감도 THz파 검출기도 개발되고 있어 가까운 시일 내 다양한 응용 분야에서 활용될 것으로 여겨진다. 본 원고에서는 최근에 연구된 고출력 연속형 THz파를 발생시키는 진공 전자 소자 신호원 기술과 연속형 THz파를 이용한 응용 기술에 대해 소개하고자 한다^{[1]-[3]}.

II. 연속형 테라헤르츠파 신호원 기술

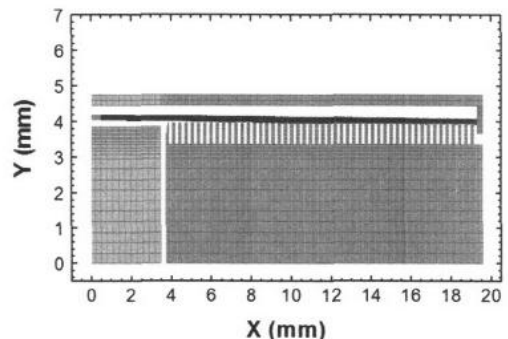
고출력 연속형 THz파 신호원을 개발하기 위해 다양한 기술을 이용한 신호원에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 원고에서는 신호원 기술 중에서 진공 내 전자빔 기반의 진공 전자 소자(vacuum electronic device) 신호원 기술에 대해 소개하고자 한다. 진공 전자 소자 신호원 중에서 많은 연구가 수행되고 있는 BWO(Backward Wave Oscillator), EIK(Extended Interaction Klystron), TWT(Traveling Wave Tube), Gyrotron, Magne-

tron 신호원으로 구분하여 소개하고자 한다.

2-1 BWO(Backward Wave Oscillator) 신호원

Microwave 대역부터 THz 주파수 영역까지 신호를 발생시키는 BWO(후방파 발진기) 신호원은 전자빔 에너지 조절을 통하여 광대역 신호를 발생시킬 수 있다^[4].

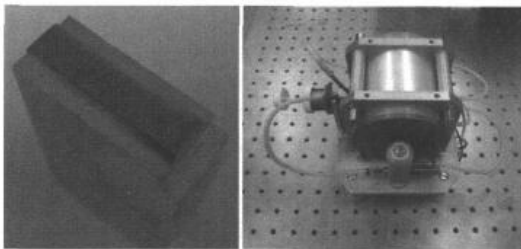
또한, THz 신호원에 적합한 MEMS 가공이 가능한 회로 구조를 적용할 수 있는 장점을 가지고 있어, 출력을 향상시키기 위해 sheet 전자빔을 적용한 소형 고출력 THz BWO 신호원 개발에 대한 연구가 수행되고 있다. BWO 신호원은 1 THz에서 1 mW의 CW 출력 특성을 가지며, 전자빔을 회로에 비스듬하게 진행하게 하는 BWO인 clinotron(클리노트론) 발진기는 0.3 THz에서 1 kW의 펄스 출력 특성을 갖는다. [그림 1]은 rectangular waveguide grating 회로를 적용한 CW 10 W급 0.1 THz clinotron 발진기의 3차원 PIC 시뮬레이션 결과이다. 전자총



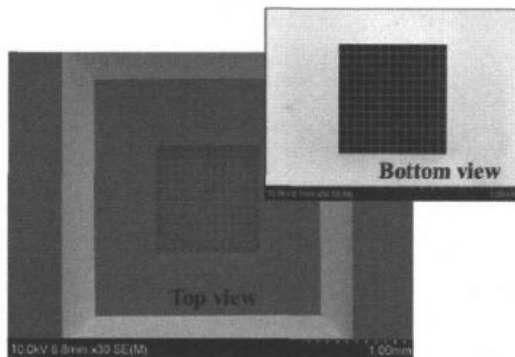
[그림 1] Rectangular waveguide grating 회로를 적용한 0.1 THz clinotron 발진기의 3차원 PIC 시뮬레이션^[5]

에서 발생된 전자빔은 오른쪽 방향으로 진행하고, 발생된 0.1 THz파는 왼쪽 방향으로 진행하여 커플러(coupler) 구조를 통하여 외부로 방사되는 구조를 갖는다⁵⁾.

CW 10 W급 0.1 THz rectangular waveguide grating 회로와 clinotron 발진기를 [그림 2]에서 볼 수 있다. 0.1 THz grating 회로는 EDM(Electric Discharge Machining) 공정을 이용하여 제작되었고, 출력을 향상시키기 위하여 열음극 기반의 sheet electron gun(전자총)이 적용되었다. 최근에는 carbon nanotube(탄소 나노튜브), platinum(백금) 냉음극 기반의 고밀도 전자빔을 발생시키기 위한 냉음극 전자총에 대한 연구도 수행되고 있다⁶⁾. [그림 3]은 냉음극 전자총에서 전자빔을 효율적으로 발생시키기 위해 silicon frame으로 제작된 micro grid의 SEM 영상이다⁷⁾.



[그림 2] 0.1 THz rectangular waveguide grating 회로와 clinotron 발진기⁵⁾



[그림 3] 냉음극 전자총(electron gun)을 위한 silicon 기반으로 제작된 micro grid의 SEM 영상⁷⁾

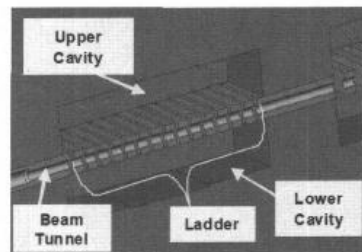
2-2 EIK(Extended Interaction Klystron) 신호원

EIK 신호원은 전자빔과 회로의 상호작용을 증가시켜 출력을 향상시키기 위해 주기적인 구조의 공진기 구조를 적용한 klystron(클라이스트론) 신호원이다⁸⁾.

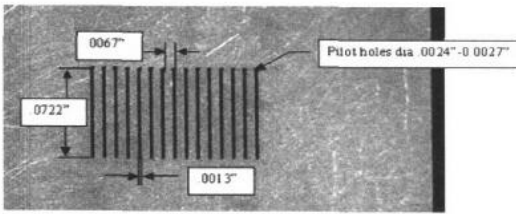
THz 대역 EIK 공진기 구조를 제작하기 위한 EDM 및 lithography 공정 기술과 고밀도 고전류 전자빔 발생 및 제어 기술의 대한 연구를 통해 0.28 THz에서 CW 0.3 W와 펄스 50 W의 출력 특성을 갖는 EIK가 연구되었다. [그림 4]는 0.67 THz EIK 신호원의 전자빔 진행 공간을 포함한 공진기 구조이다. 1 mW의 입력 신호를 이용하여 0.67 THz에서 45 mW의 출력 특성을 얻기 위하여 ladder 구조를 포함한 총 3개의 공진기로 구성되었고, 지름 100 μm 에서 100 mA를 발생시키는 800 A/cm²의 고밀도 전자총에 대한 연구가 진행되고 있다. EDM 공정으로 제작된 0.67 THz EIK 신호원의 ladder 구조를 [그림 5]에서 볼 수 있다. 수백 μm 크기를 갖는 ladder 구조의 thermal 안정성을 위하여 고밀도 전자빔에 대한 집중 연구가 중요시 되고 있다.

2-3 TWT(Traveling Wave Tube) 신호원

TWT(Traveling Wave Tube, 진행파관)는 선형 전자빔과 나선형 구조나 공진관이 서로 연결된 형태를 취하는 SWS(Slow Wave Structure, 저속파 구조) 회로와의 상호 작용으로 광대역 고출력 고효율 microwave



[그림 4] 0.67 THz EIK 신호원의 전자빔 진행 공간을 포함한 공진기 구조⁸⁾

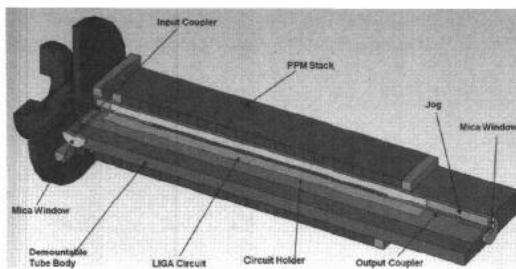


[그림 5] EDM 공정으로 제작된 0.67 THz EIK 신호원의 ladder^[8]의 SEM 영상

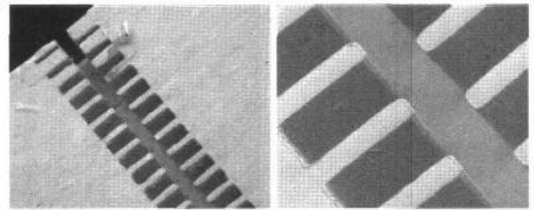
대역의 신호를 증폭하기 위하여 사용되었다. 최근에는 THz 대역에 적합한 MEMS 가공이 가능한 grating 저속과 회로, folded waveguide 저속과 회로 등이 연구되고 있고, 이를 적용한 광대역 고효율 THz 증폭기에 대한 연구가 미국, 유럽연합 등에서 활발히 진행되고 있다^{[9],[10]}. MEMS 가공된 folded waveguide 회로를 적용한 0.656 THz 신호원에서 50 mW급의 출력을 발생시켰다.

Sheet 전자빔과 PPM(Periodic Permanent Magnet) 집속을 사용하는 0.22 THz TWT 증폭기의 구조가 [그림 6]에 보여주고 있다. 광대역 신호의 증폭을 위하여 staggered double-vane grating 회로를 적용하였으며, 고효율 신호 발생을 위하여 20 kV에서 400 mA의 전류를 발생시키는 sheet 전자총을 적용하였다.

[그림 7]은 SU-8 LIGA 공정으로 제작된 0.22 THz TWT 증폭기 회로의 SEM 영상을 보여주고 있다. 높이가 75 μm 을 갖는 double-vane grating 회로를 제작하



[그림 6] Sheet 전자빔과 PPM 집속을 사용하는 0.22 THz TWT 증폭기 구조^[10]



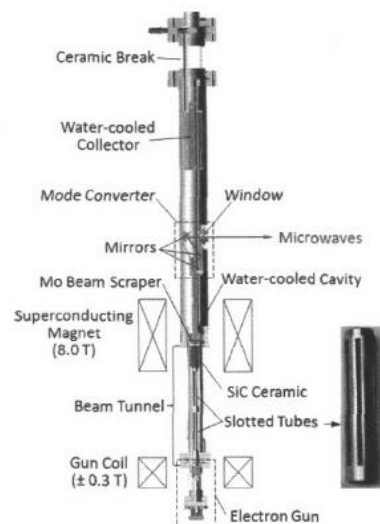
[그림 7] SU-8 LIGA 공정으로 제작된 0.22 THz TWT 증폭기 회로의 SEM 영상^[10]

기 위하여 SU-8 기반 LIGA 공정에 대한 연구가 진행되고 있고, 0.22 THz 대역에서 안정적으로 SWS 회로로 사용될 수 있음이 검증되었다.

2-4 Gyrotron 신호원

Gyrotron(자이로트론) 신호원은 선형 전자빔 기반의 EIK 신호원, TWT 신호원과 달리 회전하는 전자빔의 transverse 에너지와 transverse 전기장의 cyclotron 공진 조건을 통해 전자파를 발생시킨다.

발생되는 신호의 주파수를 외부에서 인가하는 자기장의 세기가 결정해서 THz 대역에서는 높은 자기장이 필요하지만, 고차 모드 기반의 공진기, 고전류 전



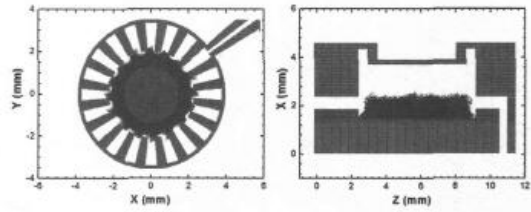
[그림 8] 0.33 THz gyrotron 발전기의 구조^[11]

자빔 등을 사용해서 THz 대역에서 고출력의 신호를 발생시킬 수 있다. Pulsed 자기장을 사용해서 1 THz 에서 1.5 kW 출력을 발생시켰고, DNP(Dynamic Nuclear Polarization) 실험을 위하여 0.33 THz 대역에서 CW 18 W의 출력을 발생시키는 고차 모드 gyrotron에 대한 연구도 수행되고 있다^{[11][12]}. [그림 8]은 0.33 THz gyrotron 발전기의 구조이다. CW 18 W의 신호를 발생시키기 위하여 25 kV 200 mA에서 동작하는 전자총으로부터 전자빔을 발생시키고, 공진기에서 발생된 THz 신호는 mirror와 mode converter를 통해 외부로 방사되는 구조로 되어 있다. 초전도 고자장 기술, 고 정밀 공진기 제작 기술, 고차 모드 동작 등을 적용하여 고출력 THz 신호를 발생하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

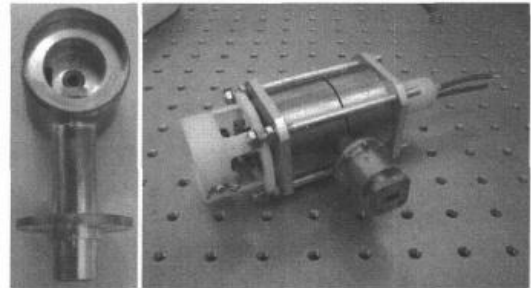
2-5 Magnetron 신호원

Magnetron 발전기는 전기장과 자기장이 서로 수직으로 인가되는 교차장이 존재하는 고진공 속에서 발생된 전자빔과 외부에 형성된 공진모드와의 상호 작용으로 전자파를 발생시킨다. 소형이면서 고출력 고효율 신호를 발생시킬 수 있어 microwave 대역에서 산업용 응용으로 많이 사용되고 있었으며, 최근에는 동작에 필요한 자기장 세기를 낮추어 주는 spatial harmonic 동작, 백금(platinum) 기반의 이차 전자(secondary electron) 음극 기술, 3차원 PIC(Particle-In-Cell) 시뮬레이션 설계 및 분석 기술 등을 접목하여 95 GHz에서 펄스 1 kW의 출력 특성을 보였고, 0.3 THz 대역에서 소형 고출력 magnetron 발전기를 개발하기 위한 연구가 수행되고 있다^{[13][14]}. 3차원 PIC 시뮬레이션을 이용하여 계산한 35 GHz 대역의 spatial harmonic magnetron 발전기의 안정화된 동작 조건에서의 전자빔 분포가 [그림 9]에 보이고 있다.

총 20개의 side 공진기로 구성되어 있고, 전기장의 변화 수인 동작 모드 16으로 동작되어 양극 주변에 16개의 전자빔 bunching이 형성되었다. [그림 10]은



[그림 9] Spatial harmonic magnetron 발전기의 3차원 PIC 시뮬레이션^[13]



[그림 10] 백금 냉음극을 적용한 밀리미터파 spatial harmonic magnetron 발전기^[13]

이차 전자 발생을 위해 백금 냉음극을 적용한 3 kW 급 35 GHz magnetron 발전기이다. Magnetron 발전기용 원형 공진기는 EDM 공정으로 제작되었고, 고진공을 유지하면서 magnetron 발전기에서 발생된 전자파를 외부로 커플링시켜 주기 위해 vacuum window는 mica 물질로 제작되었다.

III. 연속형 테라헤르츠파 응용 기술

연속형 THz파 기술의 응용 분야에는 인체 검색, 폭발물 검출 등의 국방/보안 분야 응용을 위한 생체 친화형 고해상도 영상 시스템, ADS(Active Denial System) 능동 방어 시스템, 기존 자기 공명 분광/영상 기술의 한계를 극복할 수 있는 THz파 기반 NMR(Nuclear Magnetic Resonance), DNP-MRI(Dynamic Nuclear Polarization-Magnetic Resonance Imaging), 암 진단 등의 의료, 식품 검사, 열 치료 hyperthermia, 초고속 무

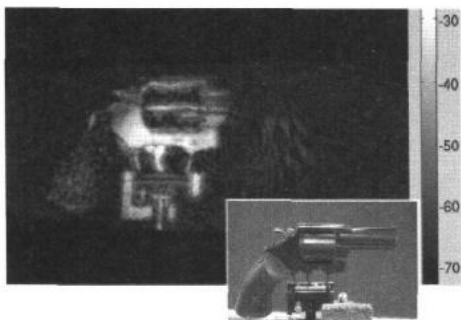
선통신, 세라믹 sintering, 유리 제조를 위한 열처리 공정 등에 활용이 가능하다. 본 원고에서는 국방/보안, 의료, 식품/재료, 통신 분야로 구분하여 연속형 THz 파 응용 기술을 소개하고자 한다.

3-1 국방/보안

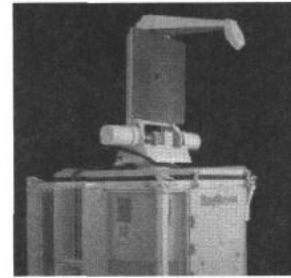
국방/보안 분야의 응용은 기존 금속 탐지기나 X-ray 보안 검색 장치의 사용이 제한적인 분야에 적용하기 위하여 THz파 능동 영상(active imaging)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다^[15].

THz파가 갖는 비극성 소재에 대한 투과성을 이용하면 다양한 물질에 대한 고유한 THz파 영상 구현이 가능하여 기존 검사 장치로는 검색이 제한적인 세라믹 무기류, 폭발성 물질 등을 안전하게 검색할 수 있다. [그림 11]은 0.62 THz파를 이용하여 0.5 m 거리에서 획득한 handgun의 THz 영상을 보여주고 있다. 영상 획득 시간을 단축하기 위하여 rotational scanning 장치를 이용하였으며, 15 cm 크기를 갖는 handgun의 영상을 10초 내의 시간 안에 획득하였다. 최근에는 실시간 고해상도 THz 영상 시스템을 위하여 배열 구조를 갖는 THz 검출기, heterodyne 검출 기술 등을 적용하여 실시간 고해상도 THz 영상을 획득하는 연구가 진행되고 있다.

고출력 THz파 신호를 인체에 방사하여 피부 통점



[그림 11] 0.62 THz파 기반 0.5 m 거리에서 획득한 handgun의 THz 영상^[15]

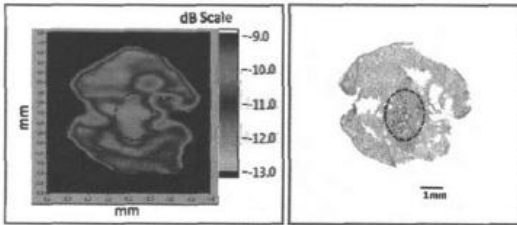


[그림 12] 95 GHz 고출력 신호원을 이용한 능동 방어 장치^[16]

위치에 고출력의 에너지를 짧은 시간동안 인가하여 화상에 해당되는 고통을 주어 일정 지역에 침입하지 못하게 하는 ADS(Active Denial System, 능동 방어 장치)에 대한 연구도 수행되고 있다^[16]. 95 GHz 고출력 신호원을 이용한 능동 방어 장치가 [그림 12]에 보인다. 0.1 THz파를 인체에 방사하면 0.4 mm 정도의 침투 깊이를 갖고, 외상으로 인한 장애를 일으키지 않아 비살상 무기로의 응용이 연구되고 있다.

3-2 의료

의료 응용으로의 THz파는 에너지가 매우 낮아 생체 조직을 파손하지 않으면서 고해상도 영상을 얻을 수 있어 THz파를 생체 조직에 조사하여 흡수량, 반사량 등의 정보를 이용하여 의료 영상을 획득할 수 있다^{[17],[18]}. 수분에 의한 높은 흡수율 등의 차이를 이용하여 암 세포와 정상 세포와 같이 수분 함량이 다른 조직을 THz 영상을 통해 쉽게 검출이 가능하여 피부 암, 구강암, 유방암 등의 암 검사, 화상 검사 등의 의료 분야에 대한 응용을 위한 연구가 수행되고 있다. [그림 13]은 0.58 THz 신호원을 이용해 획득한 skin cancer의 THz 영상을 보여주고 있다. Ex-vivo 상태의 Skin에서 반사된 THz 신호를 bolometer를 이용하여 측정하였고, 암 세포와 정상 세포에서의 반사계수 차이를 이용한 THz 영상에서 암 세포 영역을 진단할 수 있다.



[그림 13] 0.58 THz 신호원을 이용한 획득한 skin cancer의 THz 영상^[17]

연속형 THz파를 정상세포와 암세포에 인가하여 42~45도 정도의 열을 발생시키면 암세포는 42도 정도에서 괴사하기 시작하여 정상세포에 대한 피해를 최소화하면서 암세포를 선택적으로 제거할 수 있는 hyperthermia(온열 치료)에 응용할 수 있다. THz파를 이용하면 국소적인 암세포 영역에 대한 치료 시 집중이 용이하여 THz파를 이용한 hyperthermia에 대한 연구가 수행되고 있다^[19]. 밀리미터파를 이용한 쥐의 hyperthermia 실험이 [그림 14]에 보이고 있다. 쥐의 skin으로부터 1 mm 위에도 파관을 위치시켜 밀리미터파를 쥐에게 방사시켜 피부에서의 온도 분포를 측정하였고, 1.25 W/cm²의 세기에서 도파관 근처의 온도가 암 세포를 괴사시키는 온도까지 측정되었다. 최근에는 집중된 밀리미터파와 THz파를 이용한 hyperthermia 응용뿐만 아니라 관절 부위에서의 통증을 저감시키는 연구도 수행되고 있다.

연속형 THz파를 이용하면 기존 자기 공명 분광/영



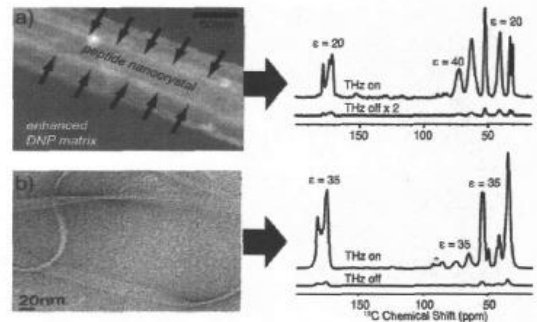
[그림 14] 밀리미터파를 이용한 hyperthermia(온열 치료) 실험^[19]

상 기술의 한계를 극복할 수 있는 DNP 분야에도 응용이 가능하다. 기존 핵자기 공명 기술이 신호 대 잡음비를 높이기 위하여 고자기장을 이용하거나 신호를 얻는 시간을 증가시켜야 하는 한계를 가지고 있었다. Electron Spin Resonance(ESR, 전자 스핀 공명)에 해당하는 THz파를 인가하여 전자의 분극을 유도하고, 이를 원자핵의 분극으로 전이하는 DNP 과분극을 이용하면, 해당 핵종의 신호를 향상시킬 수 있어 연속형 THz파를 이용한 연구가 수행되고 있다^[20].

[그림 15]는 0.263 THz파 기반 DNP를 이용한 peptide nanocrystal과 amyloid fibrils에서의 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 신호 향상 결과를 보여준다. THz파가 인가되었을 때 peptide nanocrystal에서는 20배, amyloid fibrils에서는 35배 정도 향상된 신호가 측정되었다. 이러한 결과들을 바탕으로 최근에는 생체 대사 영상과 같은 기능성 MRI(Magnetic Resonance Imaging)을 구현하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

3-3 식품/재료

연속형 THz파를 이용한 능동 영상 기술은 반도체 검사 및 단열재 검사 등과 같은 산업용 비파괴 검사, 고미술품 검사, 식품 내 이물 검사와 같이 비접촉 비파괴 검사 기술이 필요한 응용 분야에 적용하기 위한 연구가 수행되고 있다^{[21],[22]}. 0.2 THz파를 식품 검



[그림 15] 0.263 THz DNP를 이용한 NMR 신호 향상 결과^[20]

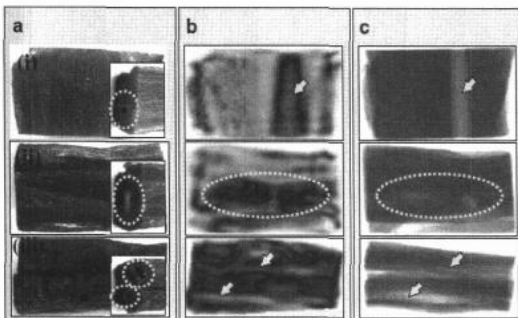
사에 적용한 예로서 홍삼 내부의 내백 부분을 검출한 THz 영상이 [그림 16]에 보이고 있다.

점선 안쪽에 위치한 영역이 내백 부분으로서 홍삼 제조 과정에서 생기는 부분으로 검출을 해야 하는 부분이다. X-ray 영상에서 검출된 내백 부분과 홍삼 내부의 공극 영역이 THz 영상에서 명확히 측정되었으며, 경계면에서의 회절로 인한 영상의 검출 특성이 향상되었음을 볼 수 있다. [그림 17]은 0.3 THz 대역 신호를 이용한 우주 왕복선용 단열재의 내부 결함의 THz 영상이다. 단열재 내부에 1 mm 크기의 금속 plate와 5 mm 미만의 공극을 형성한 후 0.3 THz파를 인가하여 획득한 반사 영상을 통해 단열재 내부의 결함이 검출되었다.

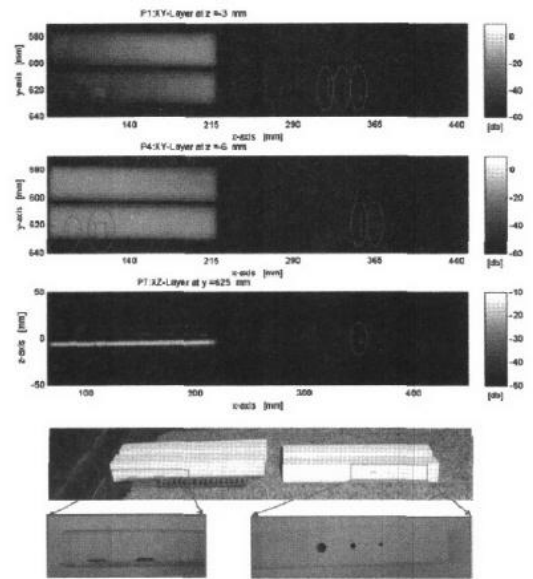
THz파를 이용한 비파괴 검사 기술은 산업 현장에서 기존 X-ray 비파괴 검사 기기의 안정성에 대한 요구가 증가되고 있어, 포장된 제품 검사 등에도 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

3.4 통신

정보통신 분야에서 데이터 전송 속도의 증가에 대한 요구를 만족시키기 위해 THz파를 이용한 차세대 통신 기술이 개발되고 있다^{[23],[24]}. THz파를 이용한 10 Gbps 이상의 무선통신 기술은 고선명 HDTV 신호 무선 전송, WLAN(Wireless Local Area Network) 등의

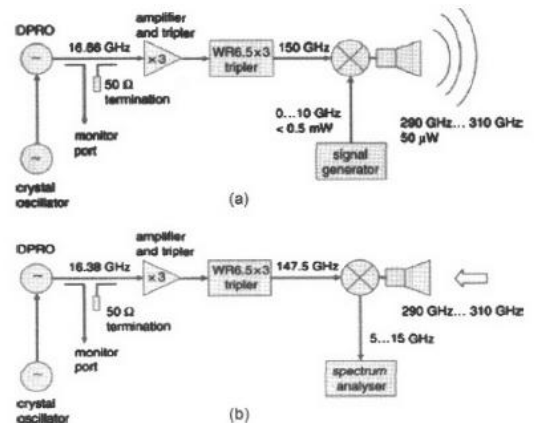


[그림 16] 0.2 THz 신호원을 이용한 홍삼의 (a) 광학 영상, (b) THz 영상과 (c) X-ray 영상^[21]



[그림 17] 0.3 THz 대역 신호를 이용한 우주 왕복선용 단열재 내부 결함의 THz 영상^[22]

응용 분야에 적용될 수 있다. THz파 기반 통신 기술은 광학적 기술 기반으로 발생된 0.12 THz 신호를 이용하여 10 Gbps 이상의 무선 전송 기술이 개발되었고, [그림 18]에 보이는 것과 같이 0.3 THz파를 이용해 송신기와 수신기를 구성하여 video 신호를 전



[그림 18] 0.3 THz 대역 신호 기반 송신기와 수신기의 구조^[24]

송하는 연구도 수행되고 있다.

IV. 결 론

의료, 식품/재료, 국방/보안, 정보 통신, 산업 응용 등 다양한 분야에서 테라헤르츠 기술을 활용하기 위한 관심이 증가하고 있으며, 전 세계적으로 기술 확보를 위해 국가 주도의 연구가 진행되고 있다. 이러한 상황에서 THz파 발생/검출 소자, THz파 제어 소자, THz 분광/영상 시스템 등에서 원천 기술을 확보해야 하고, IT, 바이오, 나노, 의료 기술 등을 접목한 다학제적 융합 연구가 필요하며, 이를 통해 향후 고부가가치 신산업을 위한 기술 확보가 가능할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

[1] P. H. Siegel, "Terahertz technology", *IEEE Trnas. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, pp. 910-928, 2002.

[2] Gerald J. Wilmink, Jessica E. Grundt, "Current state of research on biological effects of terahertz radiation", *J Infrared Milli. Terahz. Waves*, vol. 32, pp. 1074-1122, 2011.

[3] John H. Booske, Richard J. Dobbs, Colin D. Joye, Carol L. Kory, George R. Neil, Gun-Sik Park, Jaehun Park, and Richard J. Temkin, "Vacuum electronic high power terahertz sources", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech.* vol. 1, pp. 54-75, 2011.

[4] Jung-Il Kim, Seok-Gy Jeon, Geun-Ju Kim, and Jaehong Kim, "Enhancement of terahertz radiation in a smith-purcell backward-wave oscillator by an inverse wet-etched grating", *Phys. Lett. A*, vol. 375, pp. 589-592, 2011.

[5] Jung-Il Kim, Seok-Gy Jeon, Geun-Ju Kim, Jaehong Kim, Igor V. Lopatin, Mikhail V. Milcho, and

Anatoly S. Tishchenko, "Numerical and experimental investigation of 0.1 THz clinotron", *37th IRMMW-THz*, 2012.

[6] Dongwon Shin, Seok-Gy Jeon, Jung-Il Kim, Geun-Ju Kim, and Min-Sup Hur, "Electron bunching from a DC-biased, single-surface multipactor with realistically broad energy spectrum and emission angle of secondary electrons", *Phys. Plasma*, 19, p. 023113, 2012.

[7] Jaehong Kim, Seok-Gy Jeon, Jung-Il Kim, Geun-Ju Kim, Duchang Heo, Dong Hoon Shin, Yuning Sun, and Cheol Jin Lee, "Silicon-based metallic micro grid for electron field emission", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 22, p. 105009, 2012.

[8] David Chernin, Richard Dobbs, Mark Hyttinen, Albert Roitman, Dave Berry, Monica Blank, Khanh Nguyen, Vadim Jabotinski, Jeffrey Calame, Colin Joye, Baruch Levush, Jeffrey Neilson, Frank Maiwald, N. Scott Barker, Robert Weikle, and John Booske, "Development of a 670 GHz extended interaction Klystron amplifier", *IEEE International Conf. Plasma Sci.*, 2011.

[9] Colin D. Joye, Jeffrey P. Calame, Morag Garven, and Baruch Levush, "UV-LIGA microfabrication of 220 GHz sheet beam amplifier gratings with SU-8 photorresists", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, p. 125016, 2010.

[10] Anisullah Baig, Young-Min Shin, Larry R. Barnett, Diana Gamzina, Robert Barchfeld, Calvin W. Dommier, Jianxun Wang, and Neville C. Luhmann, "Design, fabrication and RF testing of near-THz sheet beam TWTA", *Tera. Sci. Tech.* vol. 4, pp. 181-207, 2011.

[11] Antonio C. Torrezan, Michael A. Shapiro, Jagadishwar R. Sirigiri, Richard J. Temkin, and Robert

- G. Griffin, "Operation of a continuously frequency-tunable second-harmonic CW 330-GHz gyrotron for dynamic nuclear polarization", *IEEE Trans. Elec. Devi.*, vol. 58, pp. 2777-2783.
- [12] M. Yu. Glyavin, A. G. Luchinin, and G. Yu. Golubiatnikov, "Generation of 1.5 kW 1 THz coherent radiation from a gyrotron with a pulsed magnetic field", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, p. 015101, 2008.
- [13] Jung-Il Kim, Seok-Gy Jeon, Geun-Ju Kim, Jaehong Kim, Victor D. Yeryomka, Olge P. Kulagin, Anatoly S. Tishchenko, and Vasily D. Naumenko, "Investigation of millimeter-wavelength 20-vane spatial-harmonic magnetron using three-dimensional particle-in-cell simulation", *IEEE Plasma Sci.*, vol. 40, pp. 1966-1971, 2012.
- [14] V. D. Naumenko, K. Schunemann, and D. M. Vavriv, "Miniature 1 kW 95 GHz magnetron", *Electron. Lett.*, vol. 35, pp. 1960-1961, 1999.
- [15] Fabian Friederich, Wolff von Spiegel, Maris Bauer, Fanzhen Meng, Mark D. Thomson, Sebastian Boppel, Alvydas Lisauskas, Bernd Hils, Viktor Krozer, Andreas Keil, Torsten Löffler, Ralf Henneberger, Anna Katharina Huhn, Gunnar Spickermann, Peter haring Bolvar, and Hartmut G. Roskos, "THz active imaging systems with real-time capabilities", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech.*, vol. 1, pp. 183-200, 2011.
- [16] Raytheon, <http://www.raytheon.com>
- [17] Cecil S. Joseph, Anna N. Yaroslavsky, Victor A. Neel, Thomas M. Goyette and Robert H. Giles, "Continuous-wave terahertz reflection imaging of *ex-vivo* nonmelanoma skin cancers", *Terahertz Technology and Applications, Proc. of SPIE*, vol. 8261, 2012.
- [18] Peter H. Siegel, "Terahertz technology in biology and medicine", *IEEE Trans. Micro. Theory Tech.*, vol. 52, pp. 2438-2447, 2004.
- [19] Imre Szabo, Stanislav I. Alekseev, Geza Acs, Alexander A. Radzievsky, Mahendra K. Logani, Vera R. Makar, Oleg R. Gordienko, and Marvin C. Ziskin, "Destruction of cutaneous melanoma with millimeter wave hyperthermia in mice", *IEEE Trans. Plasam Sci.*, vol. 32, pp. 1653-1660, 2004.
- [20] Emilio A. Nanni, Alexander B. Barnes, Robert G. Griffin, and Richard J. Temkin, "THz dynamic nuclear polarization NMR", *IEEE Trans. Terahertz Sci. Tech.*, vol. 1, pp. 145-163, 2011.
- [21] Geun-Ju Kim, Jung-Il Kim, Seok-Gy Jeon, Jaehong Kim, Kyung-Kook Park, and Chang-Hyun Oh, "Enhanced continuous-wave technology imaging with a horn antenna for food inspection", *J Infrared Milli. Terahz. Waves*, 2012.
- [22] Holger Quast, Andreas Keil, and Torsten Löffler, "Investigation of foam and glass fiber structures used in aerospace applications by all-electronic 3D terahertz imaging", *International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010.
- [23] John Federici, Lothar Moeller, "Review of terahertz and subterahertz wireless communications", *J Appl. Phys.*, vol. 107, p. 111101, 2010.
- [24] C. Jastrow, K. Munter, R. Piesiewicz, T. Kurner, M. Koch, and T. Kleine-Ostmann, "300 GHz transmission system", *Electron. Lett.*, vol. 44, 2008.

≡ 필자소개 ≡

김 정 일



2000년 2월: 서울시립대학교 물리학과 (이학사)
 2002년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학 석사)
 2006년 2월: 서울대학교 물리학과 (이학 박사)
 2006년 7월~현재: 한국전기연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 밀리미터파 소자, 테라헤르츠파 소자, 테라헤르츠파 영상 시스템

김 재 흥

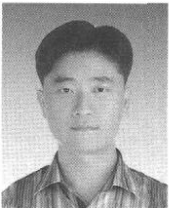


2007년 2월: 건국대학교 전자정보학과 (이학사)
 2009년 8월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터 공학과 (공학석사)
 2010년 3월~현재: 한국전기연구원 연구원

[주 관심분야] MEMS 기반 테라헤르츠파 소자

파 소자

전 석 기



1998년 8월: 서울대학교 물리교육과 (이학사)
 2001년 3월: 서울대학교 물리학과 (이학 석사)
 2005년 3월: 서울대학교 물리학과 (이학 박사)
 2005년 1월~현재: 한국전기연구원 선임

연구원

[주 관심분야] 밀리미터파/테라헤르츠파 소자 개발 및 응용

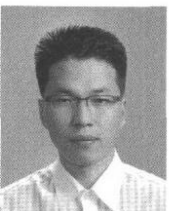
신 동 원



2009년 2월: 명지대학교 전기공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 울산과학기술대학교 전기전자컴퓨터공학부 석박통합 재학 중, 한국전기연구원 연구원

[주 관심분야] 플라스마 및 전자빔 소자

김 근 주



2001년 2월: 한국해양대학교 전기공학과 (공학사)
 2003년 2월: 한국해양대학교 전기공학과 (공학석사)
 2009년 8월: 한국전기연구원 전문연구원
 2009년 8월~현재: 한국전기연구원 선임 연구원

[주 관심분야] 펄스형 테라헤르츠파 분광/영상, 연속형 테라헤르츠파 CT 및 실시간 영상