

공학석사 학위논문

금속선을 이용한 THz 도파로의
유도특성 향상

Improvement of guidance property of THz waveguide using
metal wire

지도교수 전 태 인

2008년 2월

한국해양대학교 대학원

전기전자공학과 지 영 빈

本 論 文 을 池 永 儐 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함

위원장 장 낙 원 인

위 원 전 태 인 인

위 원 서 동 환 인

2008 년 12 월

한 국 해 양 대 학 교 대 학 원

목차

Abstract

제 1 장 서론	1
1.1 THz 도파로의 연구 배경	1
1.2 THz 도파로의 문제 제기 및 연구 내용	2
제 2 장 금속선 도파로에서의 THz의 필드 특성	3
2.1 THz 도파로의 종류 및 특징	3
2.2 단일 금속선을 이용한 THz 도파로 시스템	4
2.3 금속선 도파로에서 전파되는 THz파의 특성	6
2.3.1 유도된 THz파의 측정	6
2.3.2 유도된 THz파의 필드 분포	8
2.3.3 THz 도파로 시스템에서 측정되는 THz파에 영향을 미치는 요인	10
제 3 장 금속선 도파로의 유도 특성 향상	12
3.1 구리선과 스테인리스강선(stainless steel wire)의 도파로의 특성 비교	12
3.2 경계면에서의 전기장과 자기장	16
3.3 휘어진 영역에서의 유도특성 향상	20
제 4 장 THz파의 검출 크기 향상과 두 구리선 도파로 사이의 결합 특성	22
4.1 각도의 변화를 줄 수 있는 THz 도파로 시스템 구성	22
4.2 THz파의 검출크기 향상	23
4.2.1 도파로 끝의 직경에 변화에 따른 THz파 필드 시뮬레이션	23
4.2.2 도파로 끝의 직경의 변화에 따른 THz파 필드 측정	26
4.3 THz 영역에서의 두 구리선 도파로 사이의 결합특성	28

제 5 장 결 론 30

참고 문헌 32

그림 목차

그림 1 전자기파의 스펙트럼 1

그림 2.1 금속선을 이용한 THz 도파로 시스템 4

그림 2.2 (a) Tx의 구조와 접촉된 구리선
(b) Rx의 구조와 접촉된 구리선 5

그림 2.3 (a) 구리선 도파로로 유도된 THz파의 시간영역 그래프
(b) 구리선 도파로로 유도된 THz파의 스펙트럼 7

그림 2.4 구멍크기 조절이 가능한 장치를 설치한 구리선 도파로 8

그림 2.5 (a) 1mm~15mm의 구멍을 통과한 THz파의 시간영역 그래프
(b) 1mm와 15mm를 통과한 THz파의 스펙트럼 9

그림 2.6 칩과 구리선 사이의 공극에 따른 THz파의 변화 11

그림 3.1 휘어진 구리선을 이용한 THz파 도파로 실험 장치도 13

그림 3.2 (a) 도파로의 휘어진 깊이에 따른 THz파의 시간영역 그래프
(b) 도파로의 휘어진 깊이에 따른 THz파의 스펙트럼 14

그림 3.3 구리선과 스테인리스강선의 굽어진 깊이에 따른 침투치 변화 15

그림 3.4 구리선과 공기의 경계면의 좌표 16

그림 3.5 (a) 금속의 종류에 따른 경계면으로부터의 Hy field 18

그림 3.5 (b) 금속의 종류에 따른 경계면으로부터의 Ez field
(c) 금속의 종류에 따른 경계면으로부터의 Ex field 19

그림 3.6 (a) 구리선만 이용한 도파로의 9mm 휘어진 깊이의 THz파 변화	
(b) 두 금속선을 이용한 도파로의 9mm 휘어진 깊이의 THz파 변화	21
그림 4.1 각도 변화가 가능한 THz파 도파로 시스템	22
그림 4.2 (a) Tx칩과 접촉한 구리선 끝 모양	
(b) Rx칩과 접촉한 원뿔형 구리선 끝 모양	
(c) Rx칩과 접촉한 원통형 구리선 끝 모양	23
그림 4.3 (a) 0.26mm 의 구리선을 이용한 Ref.13의 실험 데이터와 시뮬레이션 값의 비교	
(b) 구리선 끝의 직경에 따른 THz파의 세기	25
그림 4.4 직경 500 μ m인 원통형 구리선 도파로와 직경 30 μ m인 원뿔형 구리선 도파로 끝에서의 THz파의 필드세기	26
그림 4.5 (a) 구리선 끝 모양에 따른 THz파의 시간영역의 변화 비교	
(b) 구리선 끝 모양에 따른 THz파의 스펙트럼 변화 비교	27
그림 4.6 (a) 두 구리선 각도에 따른 시간영역에서의 THz파의 변화	
(b) 각도에 따른 THz파의 침투치와 침투치 사이의 크기 변화	
(c) 구리선 끝에서의 결합정도의 벡터 표현	29

Abstract

Because of low attenuation and group velocity dispersion in THz region, single metal wire waveguides have many possible applications in THz spectroscopy and imaging. The THz field intensity concentrate on the single metal wire surface and reduce along increasing distance from metal surface.

Air gaps between the metal wire waveguide and chips(transmitter and receiver chip) are very important factor to influence variation of measured THz amplitude in THz waveguide system. When the transmitter part air gap increased, THz field intensity rapidly decreased to 10% amplitude compared with contacted case at 275 μ m air gap. In the receiver part air gap, THz field intensity slowly decreased to 48% amplitude at 275 μ m air gap as compared with the transmitter part air gap.

On the one hand, single metal wire waveguides have low attenuation and group velocity dispersion for straight area, on the other hand, the waveguides have very high attenuation and group velocity dispersion when the waveguides are curved. If conductivity of waveguide is high, the waveguide has low attenuation. However, because of very small electric field in metal, the waveguide have high attenuation when the waveguide were curved. So, using this property I used copper wire because of high conductivity for straight region and stainless steel wire because of low conductivity for curved region to minimize THz loss. Therefore, guidance property of single metal wire waveguide has improved.

Also, I investigated the coupling properties of between two copper wires. The angle-dependent wire to wire coupling effect was measured using an optical fiber guiding laser beam to the reciever chip. The

measured THz pulse intensity rapidly decreased with the increase in the angle. At 15 degrees, the THz intensity decreased by about 50% compared with 0 degree wires. Also, at 75 degrees, the THz intensity almost disappeared because there is not coupling. The distribution of the peak to peak angled THz intensity is a Gaussian distribution on centered at 0 degree.

제 1 장 서 론

테라헤르츠 (terahertz, 이하 THz) 전자기파는 그림 1과 같이 전자기파 스펙트럼에서 0.1THz~10THz의 주파수(3mm~30 μ m의 파장)를 가지고 에너지로는 4meV에 해당하는 원 적외선 영역의 전자기파이다. THz파 기술은 마이크로파나 광파가 투과할 수 없는 물질을 쉽게 투과하고 또한 광파처럼 직진성이 있고 수분에 잘 흡수되는 특성을 가지는데 이를 이용하여 THz Time Domain Spectroscopy (THz-TDS), THz-Imaging 등의 연구가 활발히 진행되고 있으며 다양한 분야로 그 응용 범위가 확장되고 있다[1-9].

최근에는 THz 통신 분야뿐만 아니라 THz-TDS와 THz-Imaging 분야등 다양한 분야로 응용이 가능한 THz 도파로(waveguide)에 대한 관심이 급격히 증가 되었다. 마이크로파 영역의 직사각형 도파로, 원형 도파로나 광파 영역의 광섬유는 THz 영역에서는 분산이 크거나 손실이 커서 사용할 수 없다. 2004년 D. Mittlman 교수에 의해 보고된 단일 금속선(single metal wire)을 이용한 도파로(waveguide)가 아주 작은 군속도 분산(group velocity dispersion)과 손실(loss)을 가지며 구조도 간단하여 THz 도파로의 표준으로 자리 잡고 있으며 3년전부터 최근까지 도파로 표면에서의 필드(field) 분포, 유도 특성에 대해 연구, 보고되고 있다[10-18].

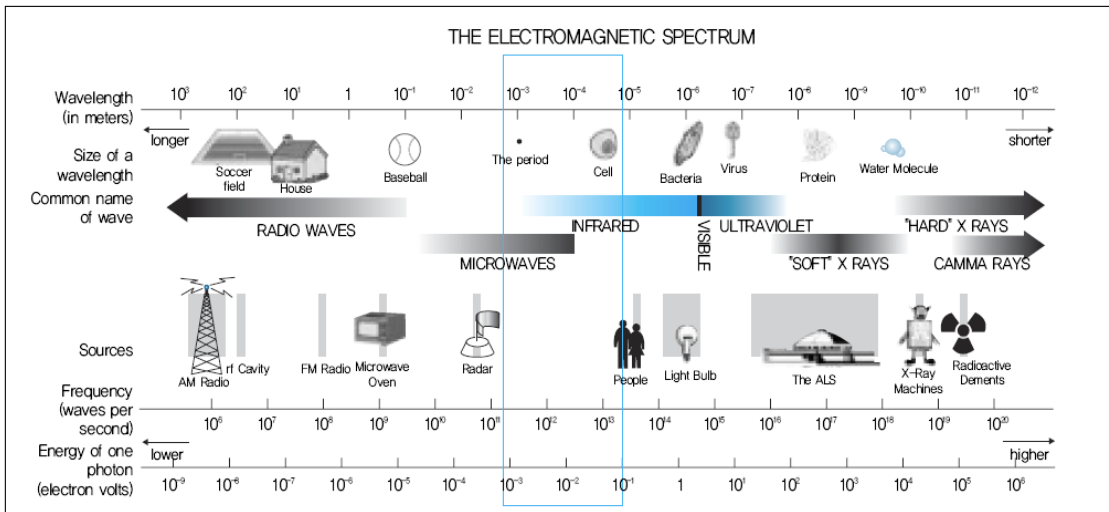


그림 1 전자기파의 스펙트럼

단일 금속선 도파로에 의해 유도된 THz 파는 금속과 유전체 사이의 경계면에서 일어나는 표면 플라즈몬(Surface Plasmon, SP) 효과에 의한 것이며[14] 1950년 A. Sommerfeld가 밀리미터파 영역에서 보고한 표면파의 일종인 Sommerfeld wave와 같은 원리를 가진다[19-21]. 유도되는 THz파는 금속선 표면을 따라 TM_{01} 모드(mode)로 진행하며 구리선 표면에 대부분의 필드가 집중되어 있다. 단일 금속선 도파로는 앞서 언급한 바와 같이 매우 작은 군속도 분산과 작은 손실을 나타내기 때문에 THz파를 유도하기에 적합하나 도파로가 휘어질 경우 공기중으로 THz의 방사가 일어나서 매우 큰 군속도 분산과 손실을 나타내고 이는 곡면에서의 약한 유도 특성(guiding property)을 나타낸다 [13-14].

본 논문에서는 이미 알려진 THz 도파로 시스템(waveguide system)을 구성하여 유도된 THz 전자기파를 측정하고 도파로 위에서의 필드 분포 및 특성들을 알아보았고, 검출되는 THz파의 크기에 영향을 미치는 요인을 조사하였다. 또한, 전기 전도도가 다른 두 금속선을 이용하여 위에서 문제제기한 곡면에서의 약한 유도 특성을 향상시키는 연구를 수행하였으며 각도 변화가 가능한 THz 도파로 시스템을 구성하여 두 금속선 사이의 THz파의 결합특성을 연구하였다. 더 정확한 실험을 위해 유도되어 검출되는 THz파의 검출크기를 향상시키는 방법을 시뮬레이션 프로그램을 이용해 이론적으로 설명하고 실험을 통해 검증하였다.

제 2 장 금속선 도파로에서의 THz의 필드 특성

2.1 단일 금속선을 이용한 THz 도파로 시스템

THz 주파수 영역에서의 도파로에 대한 연구가 최근 많이 이루어졌다. 마이크로파 영역에서 많이 사용하는 원형(circular) 도파관과 직사각(rectangular) 도파관은 THz 영역에서는 손실은 작지만 군속도 분산이 아주 크다[22]. 같은 간격의 금속 평행판 도파로는 손실과 군속도 분산이 작은 TEM 모드로 전송되지만 긴 도파로의 제작에는 한계가 있다[23]. 이를 대체해서 동축 케이블을 이용한 도파로에서 역시 TEM 모드의 THz파를 검출했지만 동축케이블의 주 도파모드인 TE_{11} 모드의 차단 주파수가 측정 범위내에 존재했으며 절연 물질인 테플론(teflon)에 의한 손실이 길이에 따라 누적되어 좋은 도파로의 역할을 기대할 수 없다[24].

2003년에 rice 대학의 D.Mittleman 교수에 의해 순수한 금속선을 이용하여 흡수율과 군속도 분산이 작은 THz파 전송에 대한 연구가 보고되었다. 이 효과는 전도성이 유한한 금속도선에서 마이크로파의 유도시 발생하는 것으로 알려져 있는 표면파의 일종인 Sommerfeld wave와 같은 것이다[10,13]. 최근에는 금속과 유전체 경계에서 발생, 속박되어 진행되는 표면 플라즈몬에 의한 효과로 이 표면파가 발생한다고 보고 되고 있다[14].

그림 2.1은 실험에 이용된 THz 도파로 시스템의 기본도이다. Ti: sapphire laser에 의해 발생된 800nm의 파장을 가지며 펄스폭이 ~60fs, 83MHz의 반복율을 가지는 레이저 빔 펄스를 송신기(Transmitter chip, 이하 Tx)와 수신기(Receiver chip)에 조사한다. THz파를 발생하고 검출하는데에 일반적으로 GaAs 기판(substrate)으로 만들어진 반도체 칩(chip)을 사용하지만[25-26], 본 실험에서는 silicon on sapphire(이하 SOS)칩을 사용했다. 발생된 THz파를 그림2.1과 같이 직접 금속선에 결합(coupling)시키기 위해서는 칩 뒷면에 레이저 펄스를 조사하여 칩을 통과하여 칩 앞면에 있는 다이폴 안테나에 초점을 맞추어야 하는데 광학적으로 불투명한 GaAs 기판은 사용할 수 없고 투명한 SOS 기판을 사용하여야 한다. 이러한 방법으로 THz파를 직접 도파로에 결합시키는

방법은 silicon lens를 사용하여 도파로에 결합시키는 준 광학(quasi optic)적 방법에[10] 비하여 커플링 손실이 적어 효율이 뛰어나다.

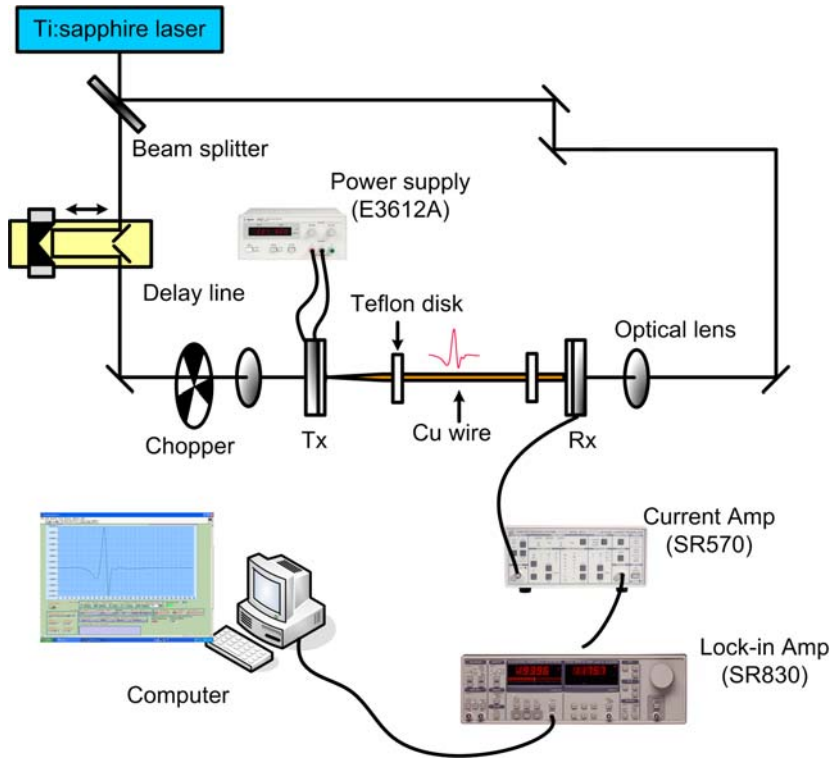


그림 2.1 금속선을 이용한 THz 도파로 시스템

그림 2.2 (a)와(b)는 Tx, Rx칩의 구조와 각각에 접촉된 구리선을 나타내었다. Tx칩은 SOS 기판위에 라인 너비가 $10\mu\text{m}$ 이고 라인 간격이 $30\mu\text{m}$ 이며 $5\mu\text{m}$ 의 간격(gap)을 가지는 다이폴 안테나 구조를 가진다. 안테나 간격 사이에 레이저 빔이 조사되면 광 운반자(photo carrier)가 여기되고 10V의 바이어스(bias) 전압에 의해 형성된 수 MV/m의 전기로 인해 광 운반자가 순간적으로 가속하여 전류가 발생되고 Maxwell 방정식 $E(t) \propto \partial J(t)/\partial t$ 에 따라 THz 전자기파가 발생된다. 실험장치에서 사용된 도파로는 직경이 $480\mu\text{m}$ 이고, 길이가 23cm인 상용 구리선을 사용하였다. 그림2.1의 실험장치도와 같이 구리선 도파로는 Tx와 Rx 칩에 직접 접(contact)해야 하므로 타이트하게 구멍을 뚫은 3mm 두께의 테플론 판(disk) 두 개를 사용하여 구리선을 지탱하고 최적의 위

치로 조절이 가능하게 했다. 테플론 판은 굴절률이 낮고 1 THz까지의 흡수율이 아주 작아서 본 실험에 구리선을 고정시킬 수 있는 이상적인 물질이라 할 수 있다[15]. THz파를 효과적으로 구리선에 결합시키고 분산을 최소화하기 위해 Tx칩과 접하는 구리선 끝을 그림 2.2(a)와 같이 30 μm 직경을 가진 원뿔형으로 가공하였다[13]. 발생한 THz파는 금속선에 직접 결합되어 구리선을 따라 전파하며 그림 2.2(b)와 같이 500 μm 직경의 금속선 끝단에서 라인사이 간격만 50 μm 이고 나머지는 Tx와 같은 구조를 가지는 Rx에 의해 검출된다.

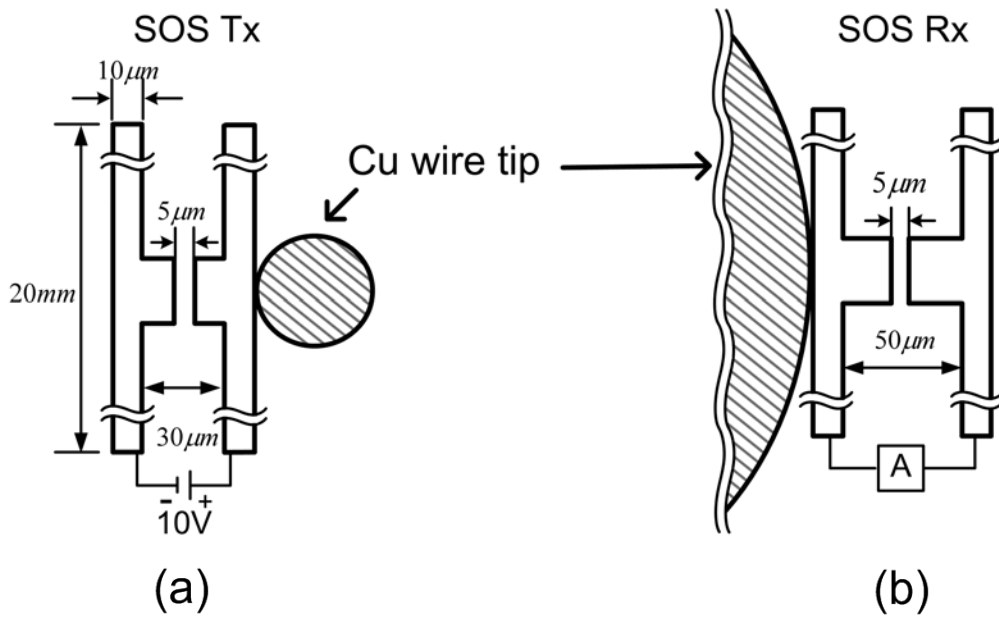


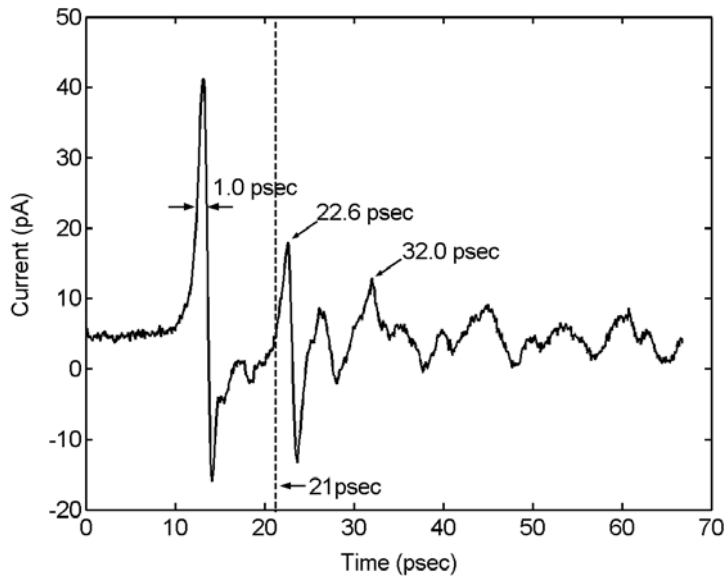
그림 2.2 (a) Tx의 구조와 접촉된 구리선 (b) Rx의 구조와 접촉된 구리선

THz파는 시간영역에서 발생과 소멸까지 10~20psec 밖에 소요되지 않으므로 기존의 오실로스코프(oscilloscope)로 측정할 수 없으며 이를 위해 광도전 광학적 샘플링 (photo conductivity optical sampling)방식을 이용하여 데이터를 얻었다.

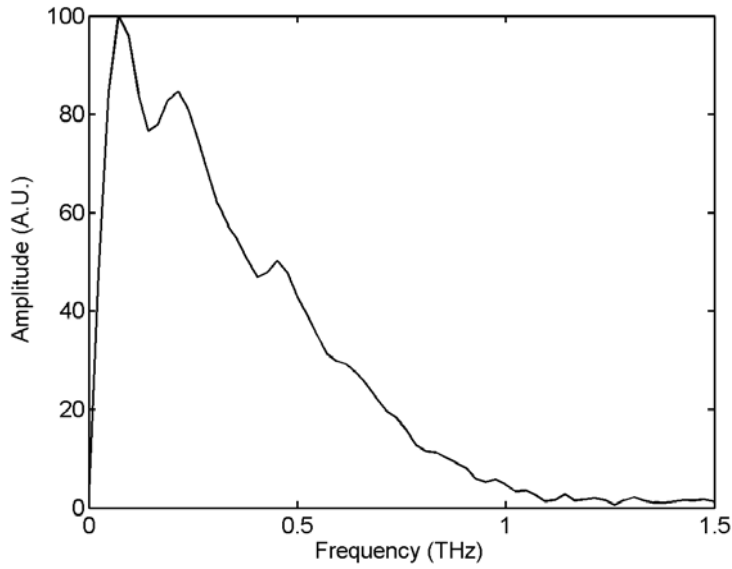
2.2 금속선 도파로에서 전파되는 THz파의 특성

2.2.1 유도된 THz파의 측정

2.2절에서 설명한 구리선 도파로에 의해 유도되어 측정된 THz파의 시간영역 그래프는 그림 2.3(a)에 나타나 있다. 13.1 psec(pico second)에 나타난 THz파가 주 펄스이고 22.6 psec와 32.0 psec에 나타난 펄스는 SOS칩 내부를 THz파가 다중반사 되어 나타난 펄스이다. 주 펄스의 반치폭(Full Width Half Maximum)은 1 psec이고 다중 반사된 펄스로 인한 스펙트럼영역에서의 진동을 제거하기 위해 0~21 psec까지의 THz파만을 FFT하면 그림 2.3(b)의 스펙트럼과 같다. 중심 주파수는 0.07THz이며 에너지는 1 THz까지 존재하는 것을 확인할 수 있는데 이는 이전 연구의 0.5 THz 보다 확장되어 나타났다[13]. 유도되는 THz파의 필드의 특성은 참고 문헌 13에 잘 나타나 있다. 참고 문헌 13을 참고하여 구리선 도파로 위를 진행하는 THz 파의 필드특성을 설명하면 THz파는 구리선 위를 TM_{01} 모드로 전파하고 아주 작은 손실과 군속도 분산을 가진다. 또한 대부분의 필드는 구리선 표면에 집중되어 있고 THz파의 전계의 세기는 0.15THz에서 그림 4.3 (a)의 그래프와 같이 표면에서 멀어질수록 a/r 로 그 크기가 감소한다. a 는 구리선의 직경으로 0.26mm이며 r 은 구리 표면으로부터의 거리이다.



(a)



(b)

그림 2.3 (a) 구리선 도파로로 유도된 THz파의 시간영역 그래프
 (b) 구리선 도파로로 유도된 THz파의 스펙트럼

2.2.2 유도된 THz파의 펄드 분포

구리선에 의해 유도되는 THz파의 주파수 성분을 비교하기 위하여 그림 2.4와 같이 구리선 중앙 위치에 구멍의 크기를 조절할 수 있는 장치를 두어 구멍의 직경을 1mm~15mm까지 1mm 간격으로 조절하여 시간영역에서 THz파의 변화를 그림 2.5(a)와 같이 측정했다. 1mm일때와 15mm일때의 반치폭은 각각 0.75psec, 0.79psec이고 그림 2.5(b)에 구멍의 직경이 1mm일때의 측정된 신호의 스펙트럼과 15mm일때 측정된 신호의 스펙트럼을 나타내었다. 15mm의 스펙트럼이 1mm일때의 스펙트럼보다 약간 저주파로 이동하였는데 구리선 표면에 상대적으로 고주파 성분이 분포한다는 것을 알 수 있고 표면에서 공기중으로의 거리 r 에 따른 분산은 공기중의 THz파와 비교해 아주 작은 것을 알 수 있다.

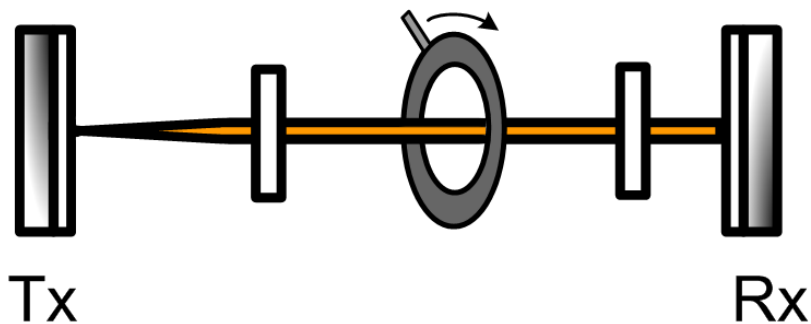
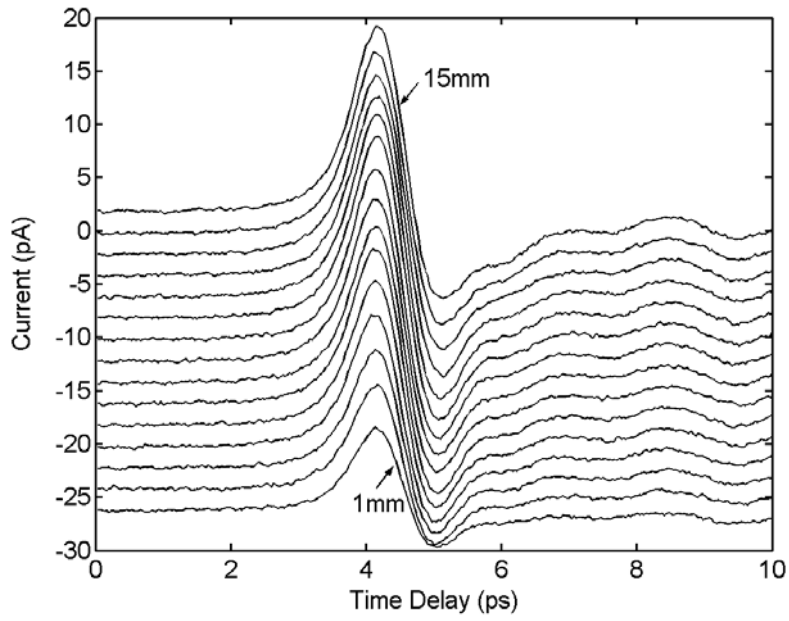
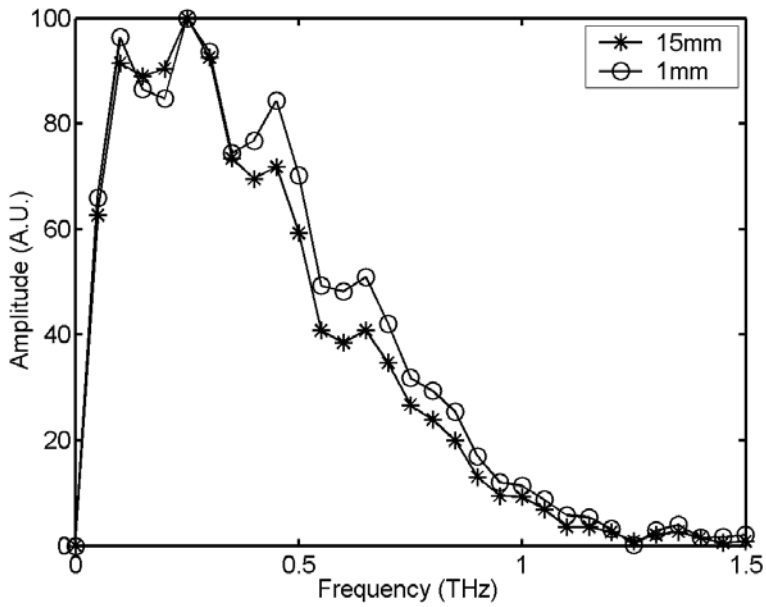


그림 2.4 구멍크기 조절이 가능한 장치를 설치한 구리선 도파로



(a)



(b)

그림 2.5 (a) 1mm~15mm의 구멍을 통과한 THz파의 시간영역 그래프

(b) 1mm와 15mm를 통과한 THz파의 스펙트럼

2.2.3 THz 도파로 시스템에서 측정되는 THz파에 영향을 미치는 요인

THz 도파로 시스템에서 측정되는 THz파의 크기에 영향을 미치는 요인은 칩의 구조와 인가되는 전압의 크기가 같다고 하면 크게 세부분으로 나눌 수 있다.

첫째, 레이저 빔의 정렬(align)상태이다. 안테나 간격이 5 μm 밖에 되지 않으므로 조금이라도 안테나 간격에서 레이저 빔이 벗어날 경우 THz파 발생과 검출이 어렵다.

둘째, 구리선(도파로) 끝의 위치이다. 금속선 도파로에서 THz파의 주 도파모드는 TM_{01} 모드이고 전계는 구리표면에서 방사형으로 퍼지는 모양으로 전송된다. 만일 이 전계 방향과 다이폴 안테나의 방향이 평행이 되지 않으면 THz를 거의 검출할 수 없다. 또한 안테나가 평행 방향이라 하더라도 구리선과 안테나 사이의 거리가 멀수록 측정되는 THz파의 크기는 작아지는데 이는 2.3.2에서 설명하였듯이 구리선위의 THz파 전계가 대부분 구리 표면에 집중되어 있고 멀어지는 거리에 따라 크기가 감소되기 때문이다.[13].

셋째, 칩과 구리선 사이의 공극에 따른 결합특성이다. 그림 2.6은 Tx칩과 구리선, 그리고 구리선과 Rx칩과의 공극에 대한 THz파의 크기를 표시한 그래프이다. Tx칩과 구리선 사이의 공극에 대한 THz파의 감소는 접촉된 상태와 비교했을 때 275 μm 거리에서 90%가 감소되었다. 위 결과는 발생한 THz 파가 공기를 통하여 구리선에 결합될 수 있으나 그 효율이 낮았다는 것을 의미한다. 그 이유는 광도전 안테나에서 발생한 THz파는 선형의 편광(polarization)을 가지는데 구리선 위에서는 이 편광이 방사형으로 바뀌게 되고 이 편광 방향의 불일치가 결합의 효율을 낮게 하는 이유가 되며[14] 이를 해결하기 위해 silicon lens의 사용이라던지[10] 본 논문처럼 직접 안테나에 접촉해야하는 부가적인 장치나 설치가 필요하게 된다. 한편 Rx칩과 구리선 사이의 공극에 대한 THz파의 감소는 Tx의 경우보다 그림 2.6과 같이 덜 민감하게 나타났는데 275 μm 에서 52%의 감소가 되었다. 대부분의 유도되는 THz파는 공기로 통과하게 되고 따라서 구리선의 끝에서도 굴절률이 같기 때문에 반사 없이 대부분 공기중으로

전파되어 Rx칩에 의해 측정되는 것이다. 따라서 Rx칩과의 공극에 대한 THz파 측정이 의미하는 바는 구리선 도파로에 의해 유도된 THz파가 구리선 끝나는 지점에서 공기중으로 마치 안테나에서와 같이 전파할 수 있다는 것이다.

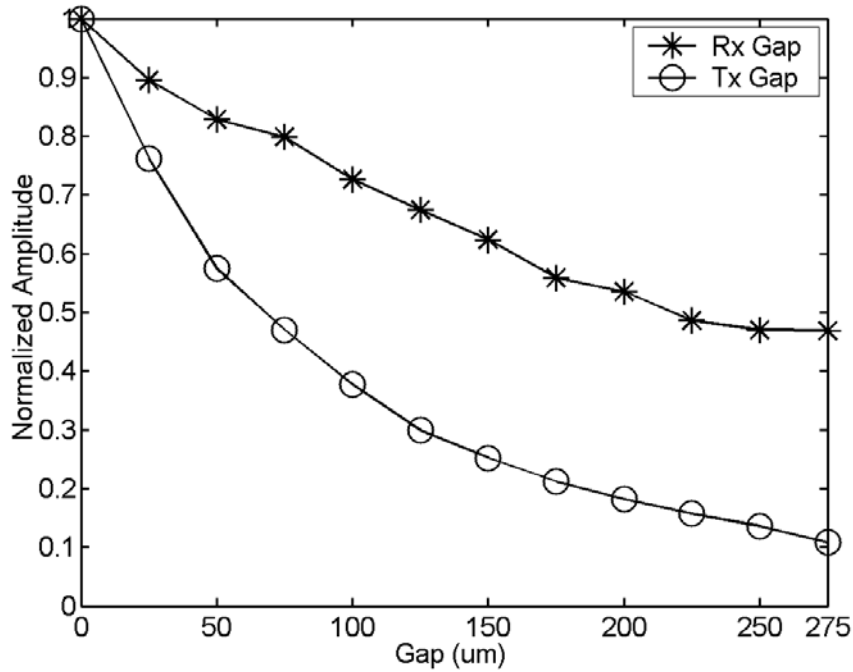


그림 2.6 칩과 구리선 사이의 공극에 따른 THz파의 변화

제 3 장 금속선 도파로의 유도 특성 향상

3.1 구리선과 스테인리스강선(stainless steel wire)의 도파로의 특성 비교

THz 금속선 도파로의 경우 도파 거리에 따른 손실이 거의 없고 균속도 분산이 아주 적어[10-14] 이상적인 도파로나 이 도파로가 직선이 아니고 휘어질 때 대부분의 THz파가 공기중으로 방사되어 손실되는 단점이 있다[13-14]. 이런 단점은 도파로의 실용화 단계에서 아주 큰 단점이 되므로 반드시 극복되어야 할 문제이다.

그림 2.1의 시스템에서 Tx측을 앞으로 밀어 그림 3.1과 같이 도파로가 휘어지게 만들어 THz파를 검출하였다.

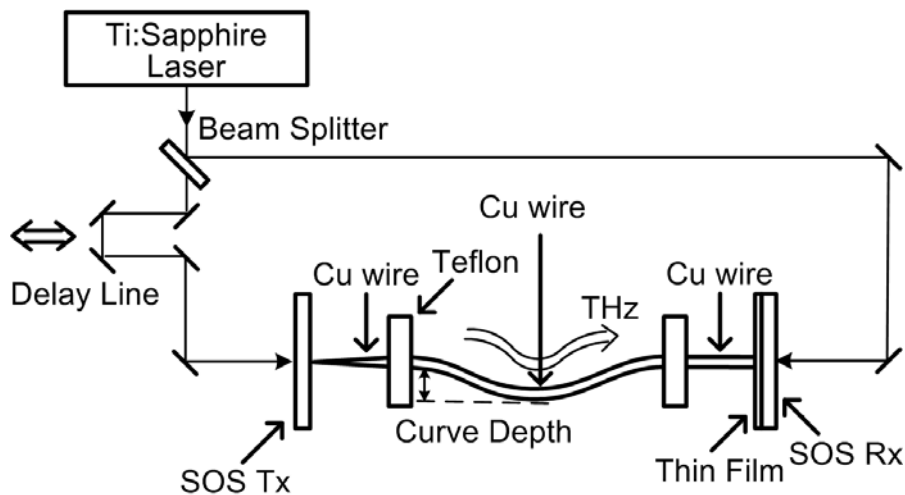
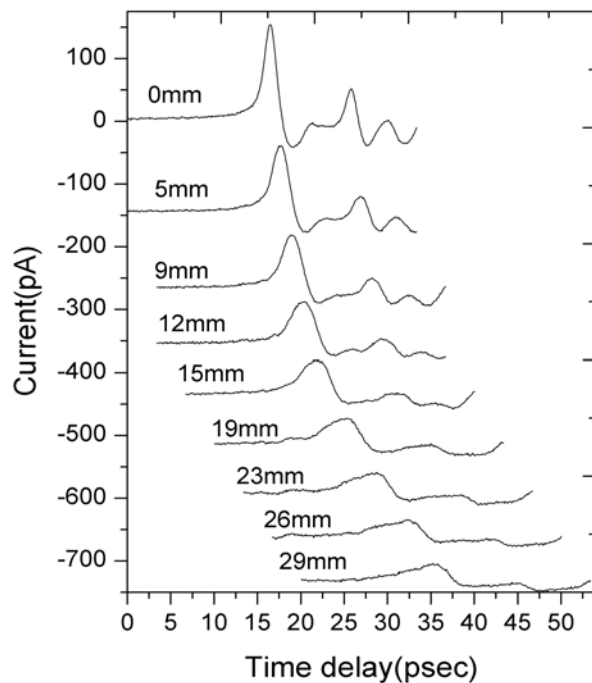


그림 3.1 휘어진 구리선을 이용한 THz파 도파로 실험 장치도

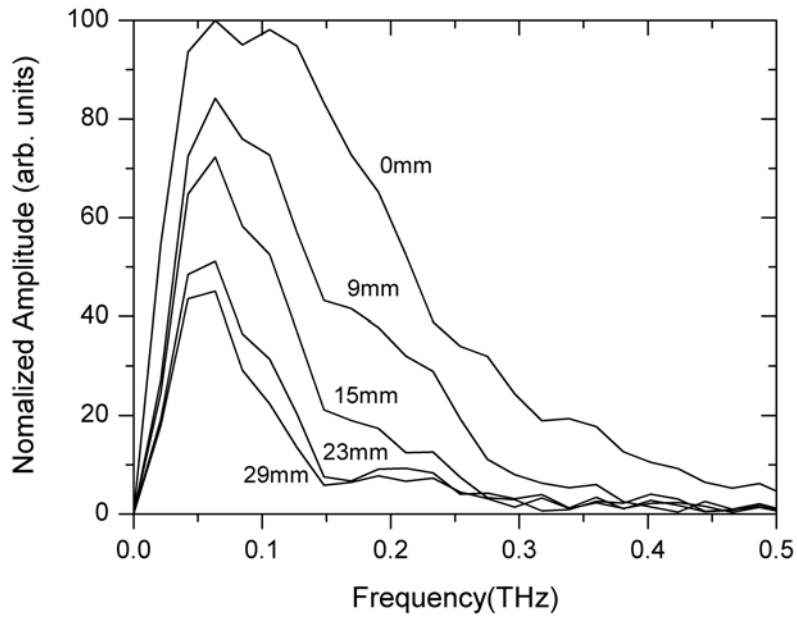
굽어진 깊이에 따른 각각의 THz파의 크기와 각 신호의 스펙트럼은 그림 3.2의 (a),(b)와 같다. 사용된 도파로는 71cm의 길이, 0.25mm의 반경을 가진 구리선을 사용하였다. 그림 3.2(a)와 같이 굽어진 깊이가 증가할수록 THz파의 침투

(peak)치는 급격히 감소되고 반치폭 또한 매우 넓어짐을 알 수 있었다. 직선일 경우 1.6psec의 반치폭을 가지고 0.5 THz의 대역폭을 가졌으나 29mm의 깊이에서는 약 5.3psec의 반치폭을 가지고 그림 2.2 (b)와 같이 0.25 THz의 대역폭으로 줄었다. 또한 굽어진 깊이가 증가할수록 파가 나타나는 시간이 지연되는 것은 도파로가 휘어짐에 따라 거리가 조금씩 늘어났기 때문이다. 침두치를 기준으로 굽어진 깊이에 따라 감소하는 그래프(실선)를 그림 3.3에 나타내었다. 40mm의 깊이에서 직선의 경우의 10%의 크기로 감소되는 것을 알 수 있었다. 이에 비하여 같은 길이, 같은 반경의 스테인리스 강선을 사용하여 위 실험을 반복하였는데 스테인리스 강선의 경우(파선)는 역시 휘어진 깊이에 따라 크기 감소가 크게 나타나지만 구리보다는 감소가 작음을 알 수 있었다. 40mm깊이에서 직선에 비해 20%의 크기를 가지고 있어 구리선 도파로 보다 더 좋은 휘어진 영역에서의 유도 특성을 가지고 있다고 할 수 있다.



(a)

그림 3.2 (a) 도파로의 휘어진 깊이에 따른 THz파의 시간 영역 그래프



(b)

그림 3.2 (b) 도파로의 휘어진 깊이에 따른 THz파의 스펙트럼

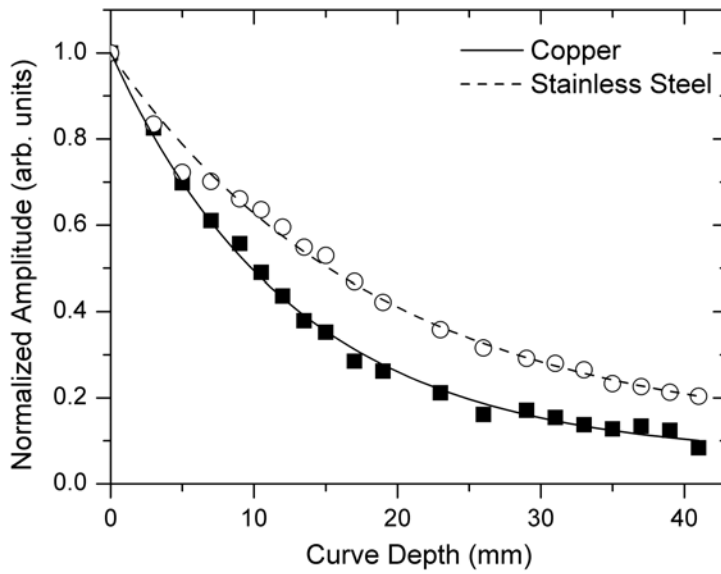


그림 3.3 구리선과 스테인리스강선의 굽어진 깊이에 따른 침투치 변화

3.2 경계면에서의 전기장과 자기장

휘어짐에 따른 유도특성이 스테인리스 강선이 구리선보다 좋은 이유는 전기 전도성이 구리 보다 낮기 때문이다. 전기전도도가 증가하면 도체 표면에서 수직인 방향인 공기중으로 향하는 전기장의 세기가 증가한다. 반면 도체 내부의 전기장의 세기는 감소하게 되며 도체가 만약 완전 도체라 가정하면 표면파인 Sommerfeld wave는 전송될 수 없다[15,20].

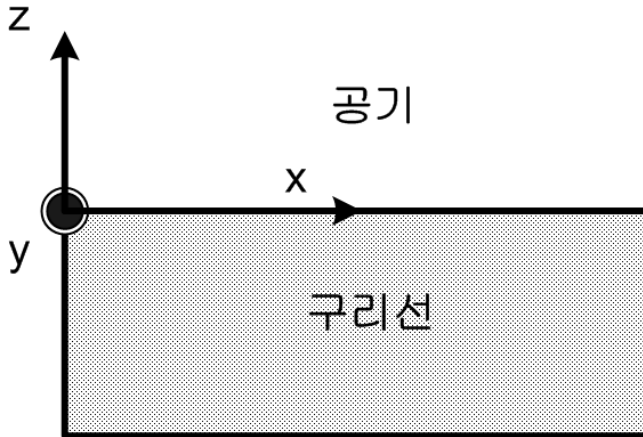


그림 3.4 구리선과 공기의 경계면의 좌표

그림 3.4와 같이 좌표축을 정의하면 THz파는 금속 표면에서 TM편파(TM polarization)로 존재하므로 H_y, E_z, E_x 성분밖에 존재하지 않는다[27]. H_y 의 성분은 금속 표면과 공기의 경계면에 놓이게 y방향의 성분만 가지게 되며 다음의 식과 같이 표현 할 수 있다[27].

$$\mathbf{H} = H_0 f(z) \exp[i(\omega t - kx)] = H_y$$

여기서 $k=k_r - ik_i$ 는 경계면에 평행한 복소 전파 상수(complex propagation constant)이다. 실수부와 허수부 전파상수는 다음과 같다.

$$k_r = k_0 \left[\frac{\epsilon_1}{(\epsilon_{r2} + \epsilon_1)^2 + \epsilon_{i2}^2} \right]^{1/2} \left[\frac{\epsilon_e^2 + (\epsilon_e^4 + \epsilon_1^2 \epsilon_{i2}^2)^{1/2}}{2} \right]^{1/2}$$

$$k_i = k_0 \left[\frac{\epsilon_1}{(\epsilon_{r2} + \epsilon_1)^2 + \epsilon_{i2}^2} \right]^{1/2} \frac{\epsilon_{i2} \epsilon_1}{[2(\epsilon_e^2 + (\epsilon_e^4 + \epsilon_1^2 \epsilon_{i2}^2)^{1/2})]^{1/2}}$$

여기서 $\epsilon_e^2 = \epsilon_{r2}^2 + \epsilon_{i2}^2 + \epsilon_1 \epsilon_{r2}$ 이고 $\epsilon_2 = \epsilon + i\sigma/(\omega\epsilon_0)$ 는 복소 유전 상수 (complex dielectric constant)이다. 구리선과 스테인리스 강선의 전기전도도 σ 는 각각 5.8×10^7 [S/m]와 0.11×10^7 [S/m]이다[28]. 위상 부분을 제외하고 H_0 는 초기값 1로 정규화 하면 H_y 의 성분은 다음과 같이 지수 함수로 표현할 수 있다.

$$f(z) = e^{-\alpha_1 z} \quad z > 0 \quad \text{in air}$$

$$f(z) = e^{\alpha_2 z} \quad z < 0 \quad \text{in metal}$$

여기서 $\alpha = k^2 - k_0^2 \epsilon_1$ 이다. $k_0 = \omega/c$ 이고 주파수 ω 에서 공기중의 파의 벡터(wave vector)이다. 이렇게 구해진 자기장은 그림 3.5(a)와 같다. E_z 와 E_x 는 Maxwell 방정식의 수식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$E_x = \frac{i}{\omega \epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z}, \quad E_z = \frac{-k}{\omega \epsilon} H_y$$

그림 3.5(b)와 (c)에 계산한 E_z, E_x 를 각각 나타내었다. 대부분의 자기장과 전기장은 금속과 공기의 경계면에 존재하며 금속내부에서는 수 마이크로미터 범위 밖에 필드가 존재하지 않는다. 그림 3.5(b)와 같이 금속내부에서의 E_z 는 스테인리스 강선에서의 세기가 구리선의 세기보다 아주 큰 것을 알 수 있고 이것이 휘어진 깊이에 따른 도파 특성이 좋은 원인이 된다. 또한 E_x 성분 역시 스테인리스 강선이 구리선 보다 큰 것을 확인할 수 있는데 금속내부에서는 $|E_z| \ll |E_x|$ 가 되고 E_x 가 SP(surface plasmon)에서의 손실의 원인이 되며

[14] 이는 스테인리스 강선의 흡수율이 구리선보다 크게 나타나는 이유가 된다[15]. 따라서 금속선의 전기 전도도가 높을수록 THz파의 진행에 따른 흡수율은 낮은 반면 금속 내부의 E_z 성분이 작아져서 휘어짐에 대한 손실도 커지게 된다.

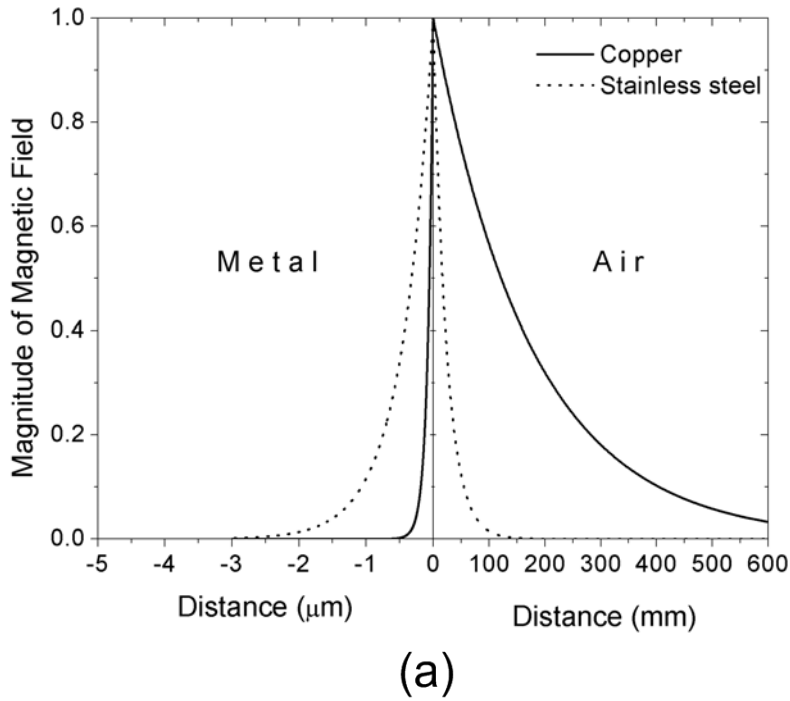
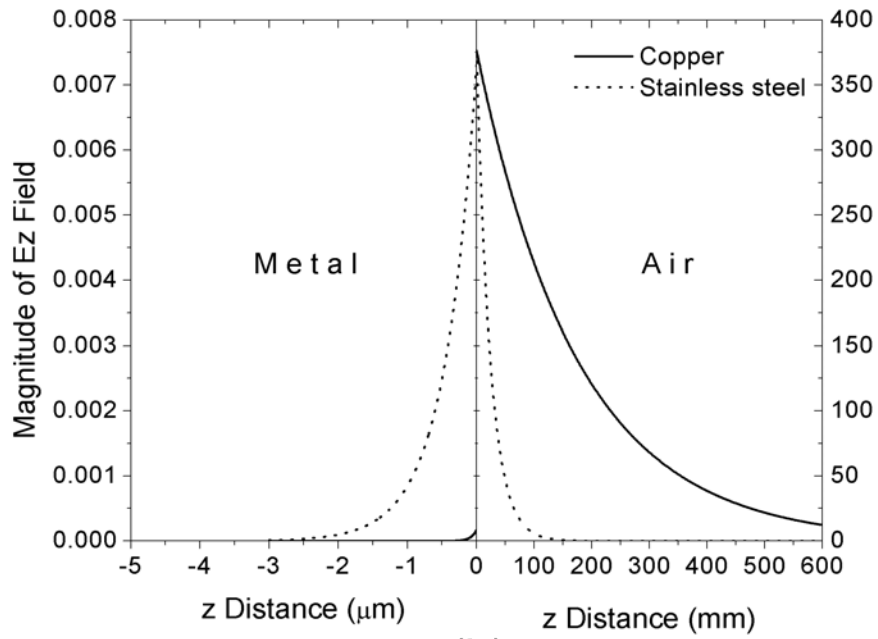
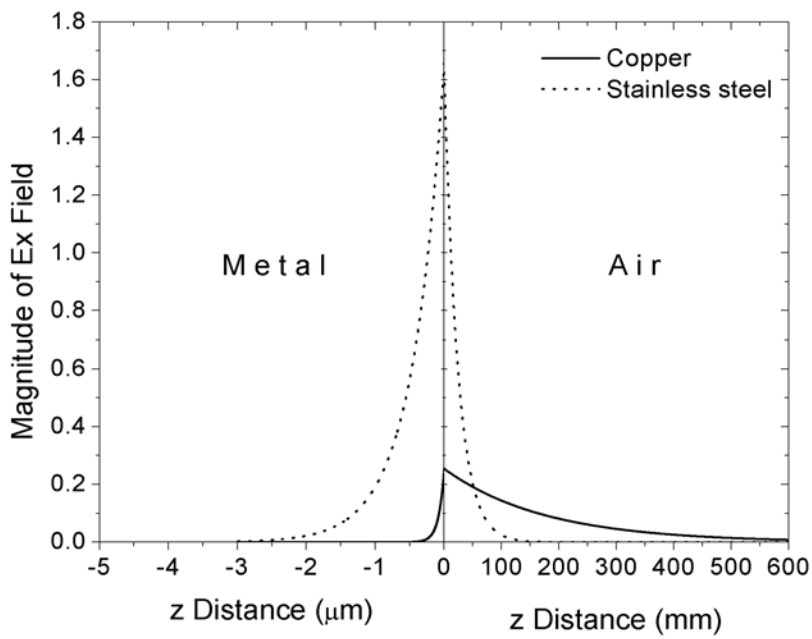


그림 3.5 (a) 금속의 종류에 따른 경계면으로부터의 H_y field



(b)

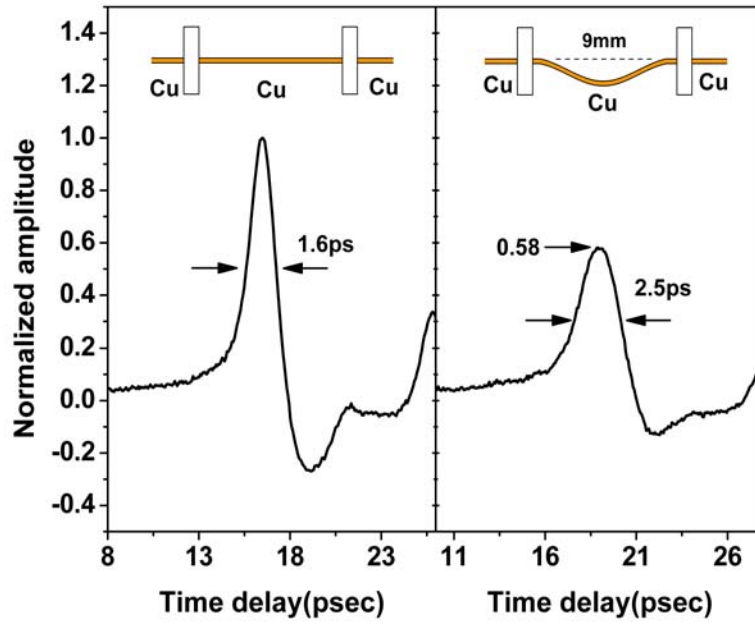


(c)

그림 3.5 (b) 금속의 종류에 따른 경계면으로부터의 E_z field
(c) 금속의 종류에 따른 경계면으로부터의 E_x field

3.3 휘어진 영역에서의 유도특성 향상

앞의 두 가지 사실에서 착안하여 각각의 장점을 이용하여 도파로의 직진영역에서는 흡수율이 작은 구리선을 사용하고 곡선 부분에서는 휘어짐에 따른 손실이 작은 스테인리스 강선을 사용하면 THz 손실을 줄일 수 있다. 종전보다 두꺼운 5mm의 테플론 판을 사용하여 테플론 내부에서 두 금속선을 접촉시키고 THz파를 유도하여 측정한 그래프를 그림 3.6에 나타내었다. 3.6(a)는 구리선만을 이용한 그래프이고 두 금속선을 이용한 것은 3.6(b)에 나타내었다. 두 금속선을 접촉시켜서 도파로로 사용하면 구리선만을 사용하여 측정했을 때 보다 반치폭이 1.6psec에서 1.9psec로 0.3psec 넓어졌다. 휘어진 깊이가 9mm가 되었을 때도 2.5psec에서 2.8psec로 같은 비율로 반치폭이 넓어진 것을 확인할 수 있었다. 이는 전도도가 다른 두 금속의 접촉면에서 THz파가 분산이 일어나는 것이라고 예상된다. 구리선만을 이용했을 때에는 9mm의 휘어진 깊이에서 직선에 대비하여 침투치가 0.58의 크기로 줄었으나 두 금속선을 이용한 도파로에서는 0.73의 크기로 줄어들어 크기 감소의 폭이 개선된 것을 확인할 수 있었고 이는 도파로의 THz파 유도특성이 향상되었다고 볼 수 있다. 그러나 펄스폭이 조금 넓어진 만큼의 스펙트럼 대역의 감소가 있으며 그 원인에 대해 향후 더 연구해야 할 것이다.



(a)

(b)

그림 3.6 (a) 구리선만 이용한 도파로의 9mm 휘어진 깊이의 THz파 변화 (b) 두 금속선을 이용한 도파로의 9mm 휘어진 깊이의 THz파 변화

제 4 장 THz파의 검출 크기 향상과 두 구리선 도파로 사이의 결합 특성

4.1 THz파의 검출 크기 향상

4.1.1 각도의 변화를 줄 수 있는 THz 도파로 시스템 구성

두 구리선 도파로 사이의 결합 특성을 알아보기 위하여 도파로 끝에서 각도의 변화를 주어 유도된 THz파를 측정할 수 있도록 그림 2.1의 시스템을 4.1처럼 변형을 주었다.

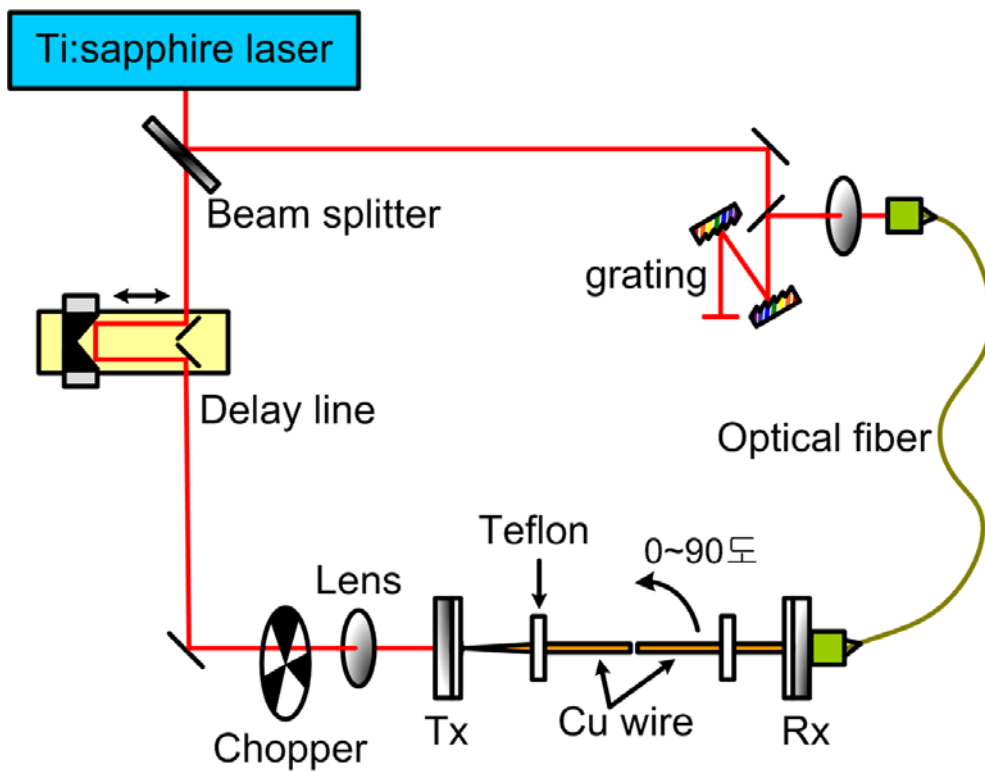


그림 4.1 각도 변화가 가능한 THz파 도파로 시스템

Rx칩에 광섬유를 이용하여 레이저 펄스를 유도하고 Rx칩에 연결된 구리선을 검출기(probe)처럼 사용하여 구리선 도파로 끝에서 THz파를 다양한 각도로 변화를 주어 측정이 가능토록 했다. 이때 레이저 빔이 광섬유를 통과하면 분산이 일어나게 되어 원하는 스펙트럼 폭을 얻을 수 없게 된다. 이를 해결하기 위해 두 개의 회절격자(grating)를 사용하여 레이저 펄스를 압축함으로써 분산되는 문제를 해결했다.

4.1.2 도파로 끝의 직경에 변화에 따른 THz파 필드 시뮬레이션

실험을 진행하는 동안 알게 된 사실로 유도된 THz파는 도파로 끝에서 결합 각도가 증가할수록 그 크기가 급격히 감소가 되어 직선일 때(각도가 0°)의 크기가 충분히 크지 않으면 정확한 실험이 불가능했다. 검출되는 THz파의 크기를 향상시키기 위해 Rx칩과 연결되는 구리선 검출기 끝을 직경 30 μm 의 원뿔형으로 가공을 했다.

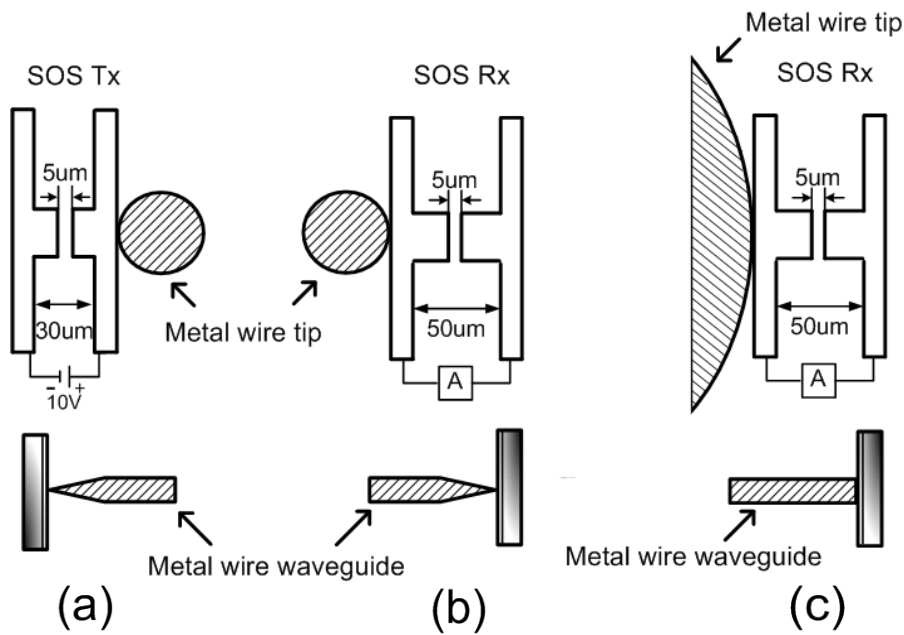
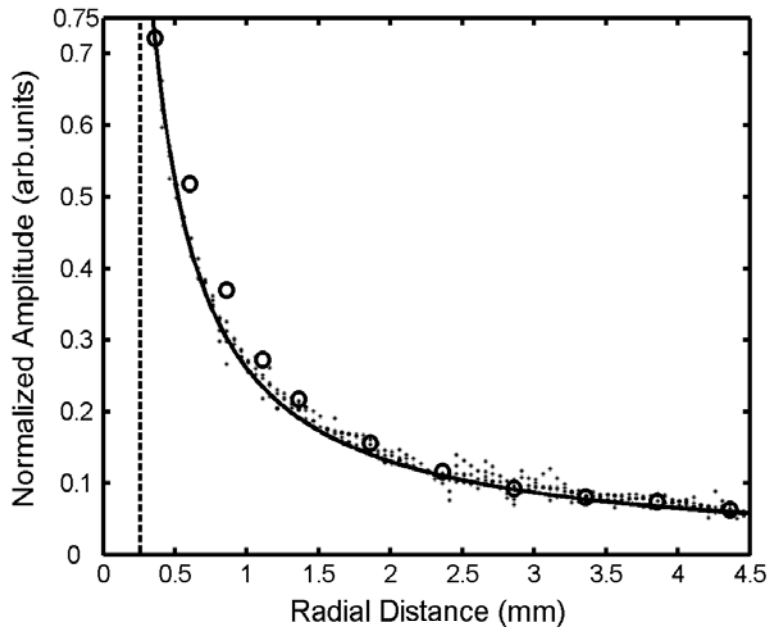
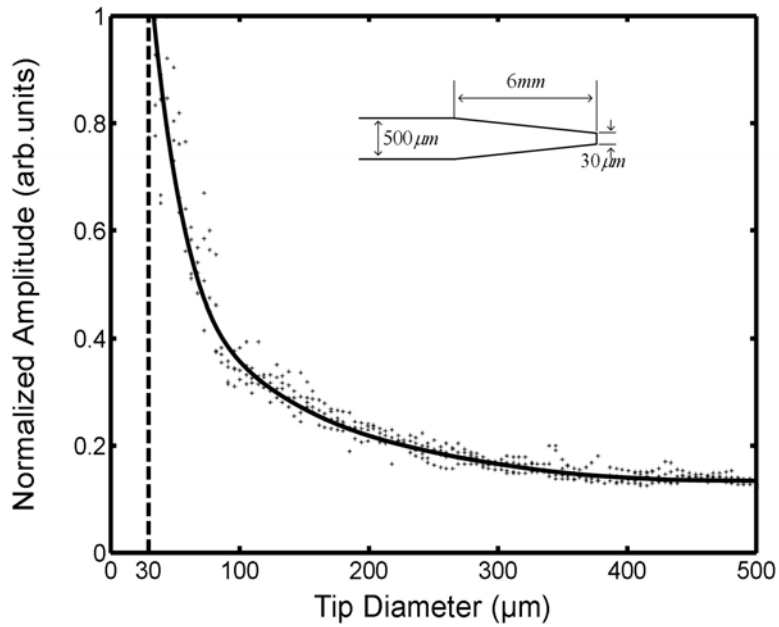


그림 4.2 (a) Tx칩과 접촉한 구리선 끝 모양 (b) Rx칩과 접촉한 원뿔형 구리선 끝 모양 (c) Rx칩과 접촉한 원통형 구리선 끝 모양

그림 4.2(a)는 Tx칩과 연결된 구리선을, 4.2 (b)와(c)는 Rx칩과 연결된 새롭게 제작한 원뿔형 구리선과 기존의 원통형 구리선을 나타내었다. 이 방법에 의한 효과를 이론적으로 검증하기 위해 전자기파의 수치적 필드 시뮬레이션 소프트웨어인 HFSS(High Frequency Structure Simulation) version 10을 사용하였다. THz Sommerfeld 전자기파의 구리선 도파로의 필드 분포는 중심 주파수 0.15THz를 이용하여 참고 문헌 13에 보고되어 있다. 참고 문헌 13에 쓰인 원통형 구리선 도파로를 HFSS로 그려서 얻어진 데이터를 그림 4.3(a)에 점으로 표현하였고 참고 문헌 13의 실험 결과 값을 원(circle)로 표현했으며, 피팅(fitting)곡선인 a/r 을 실선으로 나타내었다. $a=0.26\text{mm}$ 이고 r 은 구리표면으로부터 방사형으로 멀어지는 거리이다. 그래프와 같이 시뮬레이션 데이터가 피팅 곡선과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이를 토대로 그림 4.3(b)에 도파로 끝의 직경의 크기에 따른 필드의 세기를 시뮬레이션하여 점으로 나타내었다. 실선은 시뮬레이션 데이터를 피팅한 것이다. 필드의 세기는 도파로 끝의 직경이 $200\mu\text{m}$ 보다 작아질수록 급격히 증가함을 알 수 있었다. 이전에 쓰인 $500\mu\text{m}$ 직경을 가지는 구리선 도파로와 새로 제작하여 실험에서 사용한 $30\mu\text{m}$ 직경을 가지는 구리선 도파로의 끝에서의 시뮬레이션 필드 분포를 그림 4.4에 나타내었다. 전자기파의 필드 세기를 각각의 표면에서 $30\mu\text{m}$ 위에서 측정한 결과 값은 원통형은 21.8kV/m 이고 원뿔형은 91.5kV/m 이다. $30\mu\text{m}$ 위의 값을 사용한 이유는 본 실험에서 측정할 때 Rx측 안테나 간격의 위치가 구리선 표면에서 $30\mu\text{m}$ 위에 위치하기 때문이다. 필드의 세기는 원뿔형 구리선이 원통형 구리선 보다 약 4.2배 더 크게 나타났다.



(a)



(b)

그림 4.3 (a) 0.26mm 의 구리선을 이용한 참고 문헌 13의 실험 데이터와 시뮬레이션 값의 비교 (b) 구리선 끝의 직경에 따른 THz파의 세기

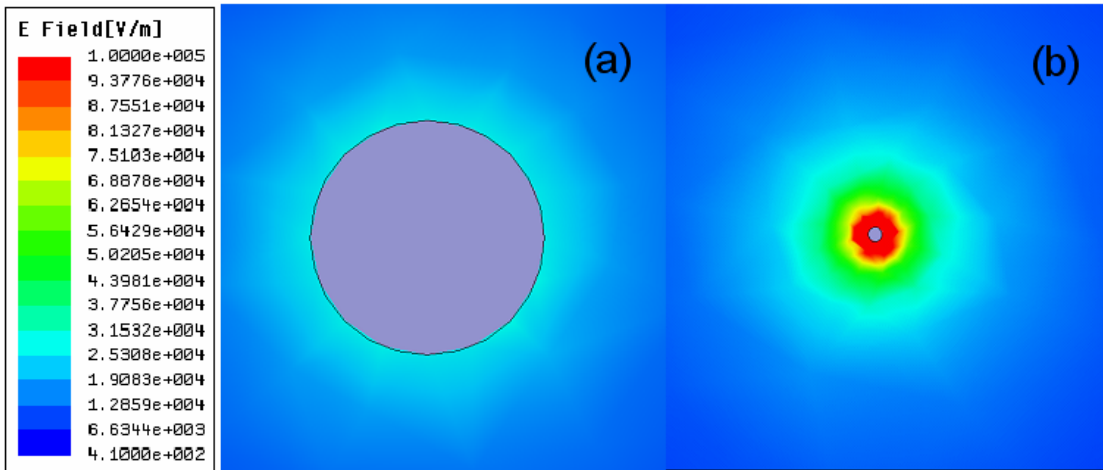
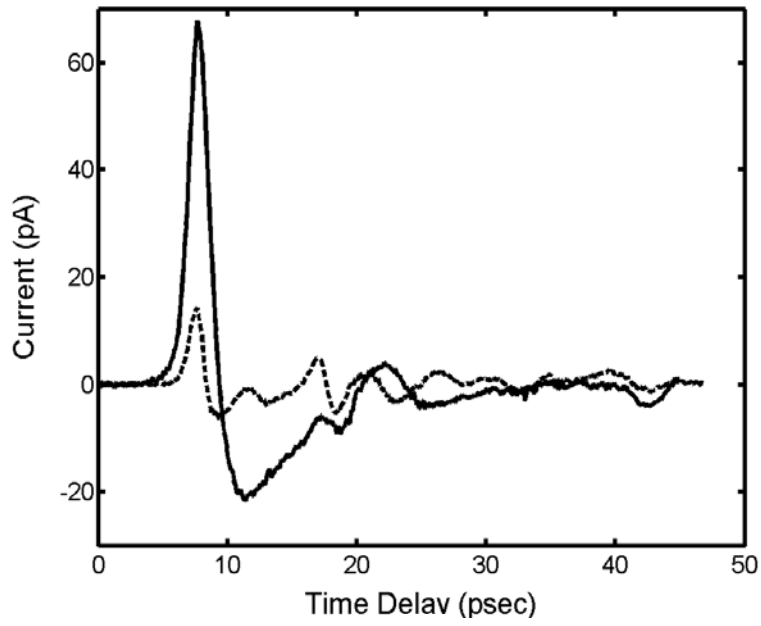


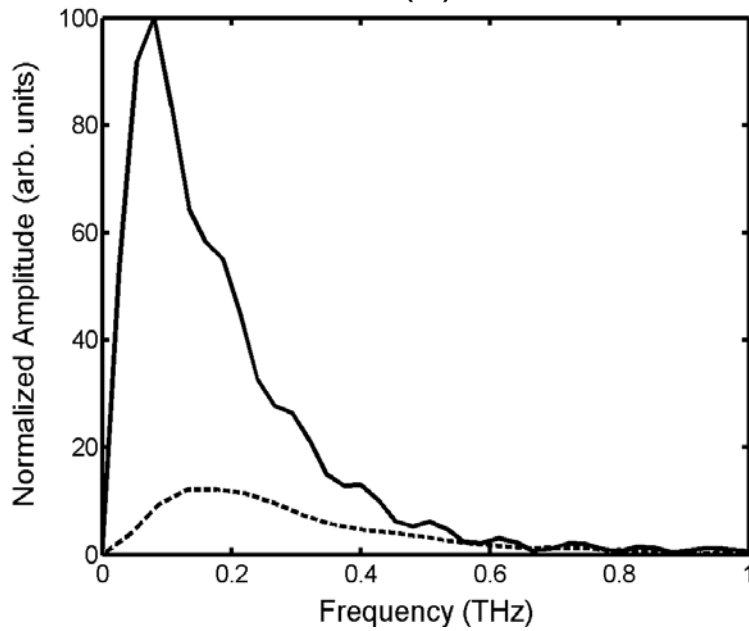
그림 4.4 직경 500 μm 인 원통형 구리선 도파로와 직경 30 μm 인 원뿔형 구리선 도파로 끝에서의 THz파의 필드세기

4.1.3 도파로 끝의 직경의 변화에 따른 THz파 필드 측정

그림 4.1의 시스템을 이용하여 Tx측에 연결된 직경이 500 μm 이고 길이가 10cm의 구리선과 Rx침에 연결된 길이가 8.5cm이고 끝단의 직경이 각각 500 μm 와 30 μm 인 원통형 구리선과 원뿔형 구리선을 사용하여 유도된 THz 펄스를 측정하였다. 그림 4.5(a)에 원통형 구리선으로 측정한 값은 파선으로, 원뿔형 구리선으로 측정한 값은 실선으로 나타내었다. 측정된 THz파의 양의 첨두치와 음의 첨두치 사이(peak to peak)값은 원통형일 경우 20pA, 원뿔형일 경우 89pA로 원뿔형 일 경우 약 4.5배 크기가 증가되었다. 이는 시뮬레이션 결과치와 비교하여 약 7%정도의 차이가 있을 뿐 거의 유사한 것을 볼 수 있다. 측정된 펄스의 반치폭은 원통형일 때 1.11psec에서 원뿔형일 때 1.66psec로 분산이 일어났고 이를 통해 그림 4.5(b)의 스펙트럼 그래프처럼 저주파 영역의 크기가 상대적으로 커진 것을 알 수 있었다. 측정된 THz파의 대역폭은 약 0.6THz이고 스펙트럼의 첨두치는 0.15THz에 위치하는데 이는 이전 측정값과 유사하다[15].



(a)



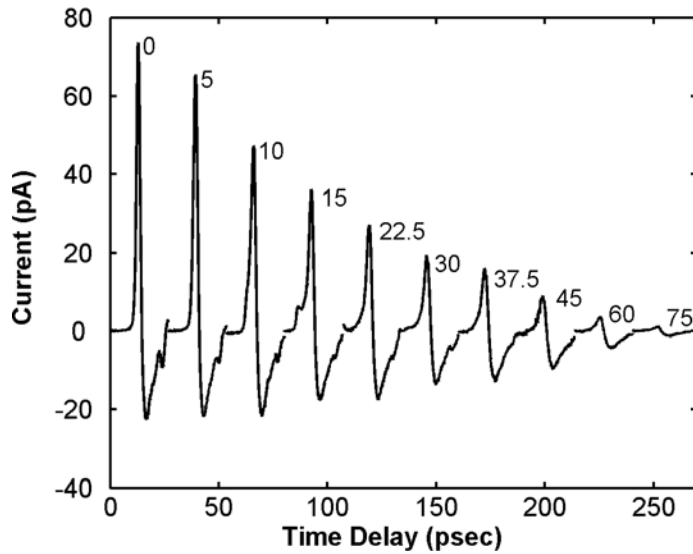
(b)

그림 4.5 (a) 구리선 끝 모양에 따른 THz파의 시간영역의 변화 비교

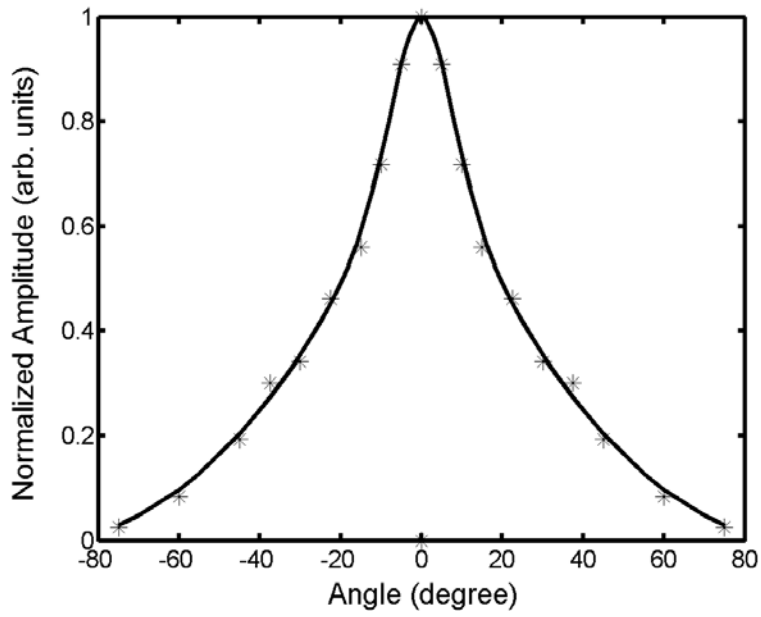
(b) 구리선 끝 모양에 따른 THz파의 스펙트럼 변화 비교

4.2 THz 영역에서의 두 구리선 도파로 사이의 결합특성

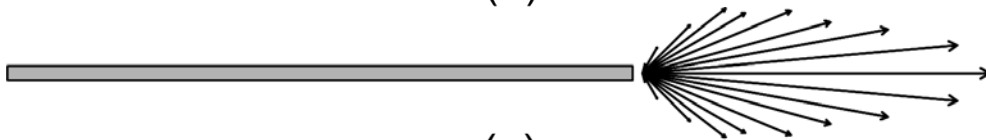
Rx측에 광섬유를 연결하여 레이저 빔을 조사했으므로 구리선 끝과 끝을 다양한 각도를 만들어 도파로에 유도된 THz파를 측정할 수 있었고 따라서 그림 4.6(a)처럼 구리선 사이의 각도에 따른 THz파를 얻을 수 있었다. 두 구리선 사이의 각도가 0° 일때 THz파의 첨두치는 73pA이고 각도가 증가할수록 급격히 그 크기가 감소했다. 각도가 75° 가 되면 대부분의 THz파는 결합되지 못하고 사라졌다. THz파 필드의 세기는 그림 4.3 (a)와 같이 구리선 표면에서 멀어질수록 그 세기가 지수함수적으로 감소한다. 각도에 변화에 따른 THz파를 측정할 때에 구리선 끝단표면에서부터 두 구리선 사이의 간격을 $100\mu\text{m}$ 로 동일하게 하여 측정하였으므로 이 측정 결과는 구리선의 각도에 따른 결합정도를 나타낸다. 각도에 따른 첨두치와 첨두치 사이의 값을 나타내면 그림 4.6(b)와 같이 Gaussian 분포를 가진다. THz파의 크기는 15° 각도에서 직선일 때에 비해 50%의 크기를 가진다. 이는 공기중에서 THz 금속선과 금속선 결합기는 0.5이상의 결합효과를 얻으려면 결합 각도를 15보다 작게 해야 한다는 것을 의미한다. 그림 4.6(c)는 구리선 끝에서의 결합정도를 vector로 표현한 것이다. 이 데이터는 가까운 미래에 THz 금속선 결합기에 이용될 것이다.



(a)



(b)



(c)

그림 4.6(a) 두 구리선 각도에 따른 시간영역에서의 THz파의 변화 (b) 각도에 따른 THz파의 첨두치와 첨두치 사이의 크기 변화 (c) 구리선 끝에서의 결합정도의 벡터 표현

제 5 장 결 론

단일 금속선을 이용한 THz파의 도파로에서의 유도되는 THz파의 필드는 대부분 구리선표면에 존재하며 표면에서 멀리 떨어질수록 그 크기가 감소하며 상대적으로 고주파 성분이 구리선 표면에 분포하였다. Tx칩,Rx칩과 구리선 사이의 공극은 THz파의 변화에 큰 영향을 미치며 Tx와 구리선 사이 공극에 따른 THz파의 변화 결과는 공기중을 전파하는 THz파가 도파로와의 결합은 하나 그 효율이 미비한 것을 나타내며 Rx와 구리선 사이의 공극에 따른 결과는 도파로의 끝에서는 THz파가 공기중으로 안테나처럼 전파하는 것을 각각 의미한다. Tx측의 공극이 Rx측의 공극보다 더 민감히 반응했다.

도파로로 사용되는 금속선의 전기 전도도가 높을수록 THz파의 흡수율은 작으나 금속 내부의 전계의 세기는 작아지게 되고 따라서 이 도파로가 휘어질 경우 더 많은 손실이 일어나게 된다. 이 특성을 이용하여 도파로의 직진 영역에서는 전도도가 높은 구리선을 사용하고 휘어지는 영역에서는 전도도가 낮은 스테인리스 강선을 사용하여 5mm의 테플론 판을 이용하여 결합시켰다. 굽어진 깊이가 9mm일때 구리선만을 이용한 도파로에서는 직선일 때의 크기에 비하여 0.58의 크기를 가지지만 두 금속을 결합한 도파로에서는 직선일 때의 크기에 비하여 0.73의 크기를 나타내어 유도된 THz파가 커진 것을 확인할 수 있었고 이는 도파로의 THz파 유도 특성이 향상된 것을 의미한다. 그러나 구리선만을 이용했을 때보다 0.3psec의 펄스폭의 분산이 일어났고 그 원인과 해결방법에 대해 더 연구해야한다.

또한 광섬유를 이용하여 다양한 각도의 변화를 주어 유도된 THz파를 측정할 수 있는 실험 장치를 구성하여 금속선과 금속선이 이루는 각도에 따라 THz파가 결합되는 정도를 구리선을 사용하여 측정하였다. 각도가 증가할수록 THz파의 크기는 급격히 감소하는데 각도가 0°일 때의 THz파의 크기가 충분히 크지 않으면 정확한 실험을 할 수 없었다. Rx와 연결되는 구리선의 끝단의 직경을 작게 할수록 검출되는 THz파는 커지는데 이를 수치적 필드 해석 프로그램인 HFSS를 이용하여 이론적으로 증명하고 실험을 통하여 확인했다. 이 방법을 사

용하여 각도에 따라 측정된 THz파는 두 구리선의 각도가 15°일 경우, 직선의 경우 보다 50%의 크기로 THz파가 감소되었고 75°의 각도에서는 대부분 THz파의 에너지가 손실되어 결합되지 못했다. 그 결합정도는 각도에 따라 Gaussian형태로 나타났으며 이 데이터는 가까운 미래에 THz파의 금속선 결합기의 제작에 사용될 것이다.

참고 문헌

- [1] R.H. Jacobsen, D.M. Mittleman, and M.C. Nuss, "Chemical Recognition of Gases and Gas Mixtures with Terahertz Waves," *Opt. Lett.*, Vol.21, p.2011 (1996).
- [2] R.A. Chevillat and D. Grischkowsky, "Far-infrared Terahertz Time-Domain Spectroscopy of Flames," *Opt. Lett.*, Vol.20, p.1646 (1995).
- [3] C. Ronne, P.O. Astrand, and S.R. Keiding, "THz Spectroscopy of Liquid H₂O and D₂O," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.82, p.2888 (1996).
- [4] C. Ludwig, T. Sekinger, J. Kuhl, M. Tani, K. Sakai, M. Hangyo, S. Miyazawa, and M. Mukaide, "Electrodynamic c-Axis Properties of YBa₂Cu₃O₇ - Thin Films in the THz Frequency Regime," *Physica Stat. Solidi B. Basic Research*, Vol.213, p.405 (1999).
- [5] B.B. Hu and M.C. Nuss, "Imaging with Terahertz Waves," *Opt. Lett.*, Vol.20, p.1716 (1995).
- [6] D.M. Mittleman, J. Cunningham, and M.C. Nuss, "Imaging with Terahertz Waves," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.71, p.161 (1997).
- [7] Crawley D, Longbottom C, Wallace V. P., Cole B, Arnone D, Pepper M., "Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue," *J. Biol. Opt.*, vol. 8, pp. 303-307 (2003).
- [8] R. M. Woodward, V. P. Wallace, D. D. Arnone, E. H. Linfield and M. Pepper, "Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain," *J. Biol. Phys.*, vol. 29, pp. 257-261 (2003).
- [6] M. R. Leahy-Hoppa et al., "Wideband terahertz spectroscopy of explosives," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 434, no. 4-6, pp. 227-230 (2007).

- [7] Y. C. Shen et al., "Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 24, p. 241 116 (1986).
- [8] K. Kawase, Y. Ogawa, and Y. Watanabe, "Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints," *Opt. Express*, vol. 11, no. 20, pp. 2549-2554 (2003).
- [9] F. Huang et al., "Terahertz study of 1, 3, 5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 23, pp. 5535-5537 (2004).
- [10] K. Wang and D. M. Mittleman, "Metal wires for terahertz wave guiding," *Nature (London)* 432, 376-379 (2004).
- [11] K. Wang and D. M. Mittleman, "Dispersion of surface plasmon polaritons on metal wires in the terahertz frequency range," *Phys. Rev. Lett.* 96, 157401 (2006).
- [12] M. Wächter, M. Nagel, and H. Kurz, "Frequency-dependent characterization of THz Sommerfeld wave propagation on single wires," *Opt. Exp.* 13, 10815-10822 (2005).
- [13] T.-I. Jeon, J. Zhang and D. Grischkowsky, "THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire" *Appl. Phys. Lett.* 86, 161904 (2005).
- [14] Q. Cao and J. Jahns, "Azimuthally polarized surface plasmons as effective terahertz waveguide," *Opt. Exp.* 13, 511-518 (2005).
- [15] Y. B. Ji, E. S. Lee, J. S. Seok, T.-I. Jeon, M. H. Kwak, and K.-Y. Kwang, "Guidance Properties of Metal Wire Waveguide by Terahertz Pulse Propagation," *J. Kor. Phys. Soc.* 50, 1238-1242 (2007).
- [16] T.-I. Jeon, and Y. B. Ji, "The coupling characteristics of THz electromagnetic wave using copper wire waveguide," *Han. Kwa. Hoe.* 17, 3 (2006).

- [17] Q. Cao and A. Nahata, "Coupling of terahertz pulses onto a single metal wire waveguide using milled grooves," *Opt. Express* 13, 7028-7034 (2005).
- [18] J. A. Deibel, K. Wang, M. D. Escarra, and D. M. Mittleman "Enhanced coupling of terahertz radiation to cylindrical wire waveguides," *Opt. Express* 14, 279-290 (2006).
- [19] A. Sommerfeld, "Electrodynamics" Academic, New York, p. 177 (1952).
- [20] G. Goubau, "Surface waves and their application to transmission lines," *J. Appl. Phys.* 21, 1119 (1950).
- [21] M. J. King and J. C. Wiltse, "Surface-wave propagation on coated or uncoated metal wires at millimeter wavelengths," *IRE Transactions on Antennas and Propagation AP-10*, 246 (1962).
- [22] G. Gallot, S.P. Jamison, R.W. McGowan, D. Grischkowsky, "THz Waveguides" *J. Opt. Soc. B.*, Vol. 17, 851- 863 (2000).
- [23] R. Mendis and D. Grischkowsky, "Undistorted guided wave propagation of sub-picosecond THz pulses," *Optics Letters*, Vol. 26, 846-848 (2001).
- [24] Tae-In Jeon and D. Grischkowsky, "Direct optoelectronic generation and detection of subps electrical pulses on sub-mm coaxial transmission lines," *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No.25, 6092-6094 (2004).
- [25] M. Tani, S. Matsuura, K. Sakai, and S. Nakashima, "Emission Characteristics of Photoconductive Antennas Based on Low-temperature-grown GaAs and Semi-insulating GaAs," *Appl. Opt.*, Vol.36, p.7853 (1997).
- [26] G. Gupta, J.F. Whitaker, and G.A. Mourou, "Ultrafast Carrier Dynamics in III-V Semiconductors Grown by Molecular-beam Epitaxy at Very Low Substrate Temperatures," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.28, p.2464 (1992).

- [27] F. Yang, J. R. Sambles, and G. W. Bradberry, “Long-range surface modes supported by thin films,” *Phys. Rev. B* 44, 5855–5872 (1991).
- [28] P. A. Rizzi, “*Microwave Engineering Passive Circuit*” Prentice Hall, Indiana, p. 532 (1988).