



## 이중 구리선을 이용한 THz 도파관의 전파 특성

Propagation Properties of Terahertz radiation on Two-Wire Waveguide



한국해양대학교 대학원

전기전자공학부 조 정 상

## 본 논문을 조정상의 공학석사 학위논문으로 인준함.







한국해양대학교 대학원



List of Fig	gures	iii
Abstract		v

1. 서	론	 1

## 2. 본 론

ABITIME II.					
2.	본	론			
	2.1	이중 구리선 도파관	4		
		2.1.1 실험 장치 구성	4		
		2.1.2 테플론 고정대의 형태에 따른 효율	7		
		2.1.3 이중 구리선 도파관의 전파 특성	12		
		2.1.4 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성	18		
		2.1.5 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성을 이용한 THz 분배기	21		
,	2.2	테플론 코팅된 이중 구리선 도파관	24		
		2.2.1 실험 장치 구성	24		
		2.2.2 도체에 따른 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 특성	26		
		2.2.3 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 전파 특성	29		
		2.2.4 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성	33		
3.	결	론	37		

참고문헌 ..... 39

# List of Figures

Fig. 1 광학영역 및 전자기파의 스펙트럼	1
Fig. 2 이중 구리선 도파관의 기본 실험 장치 구성	4
Fig. 3 (a) THz파 결합에 사용되어진 텅스텐 팁	5
(b) 다이폴 안테나 칩 위에 정렬되어진 텅스텐 팁	
Fig. 4 테플론 고정대의 다양한 형태에 따른 Reference와 Sample의 크기 비	8
Fig. 5 (a) 이중 구리선 도파관의 전파모드의 시뮬레이션 그림	9
(b) 테플론 고정대의 형태에 따른 시뮬레이션 크기 비	
Fig. 6 구리선 전체를 감싼 테플론 디스크의 시간, 주파수 영역 측정값	11
Fig. 7 도파관의 길이에 따른 시간영역에서의 THz파 신호크기 및 신호 폭	12
Fig. 8 (a) 이중 구리선 도파관의 길이에 따른 주파수영역에서의 크기 값	13
(b) 도파로의 크기 흡수율	
Fig. 9 새로운 고정대를 이용한 이중 구리선 도파관의 시간영역	15
Fig. 10 (a) 새로운 고정대의 이중 구리선 도파관의 주파수영역	16
(b) 기존의 도파관과 새로운 고정대를 이용한 도파관의 흡수율	
Fig. 11 (a) 모든 길이에서 신호가 동위상임을 가정하여 계산 값으로	17
만들어진 2000mm 도파관의 THz파 시간영역	
(b) Fig. 9(c)에서 측정된 THz파 시간영역 신호.	
Fig. 12 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성 조사를 위한 실험 구성	18
Fig. 13 굽힘 깊이에 따른 시간영역에서의 THz신호 변화	19
Fig. 14 (a) 이중 구리선 도파관의 주파수 영역	20
(b) 단선, 이중 구리선 도파관의 첨두치 비교	
Fig. 15 이중 구리선 도파관을 이용한 THz파 분배기	21
Fig. 16 이중 구리선 분배기의 시간, 주파수 영역	22
Fig. 17 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 실험 구성	24
Fig. 18 각각 다른 도체를 가진 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관	26
Fig. 19 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 시간, 주파수 영역	27
Fig. 20 길이에 따른 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관 시간, 주파수 영역	29



- Fig. 22 (a) 다양한 종류의 도파관의 크기 흡수율 비교
   31

   (b) (a)의 Y축을 0에서 0.04까지 표시한 그래프
- Fig. 23 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 굽힘 실험 구성 ...... 33
- Fig. 24 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 시간, 주파수 영역 ...... 34
- Fig. 25 360도 회전한 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관 실험 구성 사진 ...... 35

도파관의 시간, 주파수 영역





### Propagation Properties of Terahertz radiation on Two-Wire Waveguide

Jeong sang Jo

Department of Electrical and Electronics Engineering Graduate School of Korea Maritime University

#### Abstract

In this paper, we have described the various characteristics of the two-wire transmission lines. The lines consist of two 0.4mm (or 0.5mm) diameter copper wires with centers separated by 1.0mm.

Scattering coupling is generally used in order to combine the THz wave with two-wire lines in the previous study. Instead of this method, we have used two tungsten probes with 1 µm diameter tips in near-contact with the pulse generating and receiving antennas. It can improve the coupling efficiency because the dipole antenna radiation pattern is similar to the propagation mode on two-wire transmission lines. We have made the waveguide holder with wide bandwidth, high

**KEY WORDS:** Terahertz (THz); two-wire; pulse propagation; amplitude absorption; low-loss



efficiency by Teflon disk experiments of various forms. But, the remaining serious practical problem is how to support the wires and how to maintain their separation without disturbing the TEM mode propagation for long distance. To solve this problem, we have fabricated the two-wire lines using Teflon tube. The 150 µm thick Teflon covered two-wire lines are prepared by removing the two original stranded wires separated by 1.0 mm between the wire centers from the commercial Teflon covered two-wire lines and replacing them with the same solid Cu wire used in the air spaced two-wire lines.

A single wire waveguide have high attenuation when the waveguide were curved, and Parallel-plate waveguide has the drawback of bending setup. Unlike other waveguide, two-wire waveguide has the advantage of bending experimental configuration with low attenuation. We also investigate the bend characteristics of two-wire waveguide.



### 제1장서론

테라헤르츠(Terahertz, THz)는 0.1~10THz의 전자기파 영역을 뜻한다. 1THz는 10<sup>12</sup>Hz를 뜻하며, 자유공간에서 0.3mm의 파장의 길이를 가지고 있다. 또한 1THz에서 4.1meV의 광자에너지를 가지고 있다. 광파와 전파의 중간적 위치에 있는 THz파는 과거, 신호원 및 다른 기술능력의 부재로 연구되지 않은 미개척 분야였지만, 현재는 과학기술의 발달에 의하여 비약적인 발전을 이루었다.



현재 THz영역에서 도파관(Waveguide)은 형태의 다양함과 여러 분야로의 응 용가능성 때문에 급격한 관심을 받고 있다. 이러한 도파관의 선택에 있어서 저 손실 전파특성은 아주 중요한 부분이다. 예를 들어, 상업적으로 널리 사용되는 넓은 대역폭(Bandwidth)을 가진 동축케이블의 경우는 50GHz에서 8.5 dB/m의 전력손실을 보이고 있다.<sup>1</sup> 동축케이블에 인가하는 신호의 주파수가 증가함에 따 라서 500GHz에서 85 dB/m로 손실이 크게 증가하게 되고, 동축 케이블의 구조 가 작아지면 500GHz에서 278 dB/m로 손실은 더욱 더 커지게 된다. 이러한 손 실의 증가는 도파관의 활용 범위를 제한시키기 때문에 적절한 도파관 선택이 필수적이다.



도파관은 고속의 슈퍼컴퓨터에서 데이터를 주고받기 위한 인터커넥터로 사용 되어 진다. 현재 슈퍼컴퓨터간의 연결을 위하여 사용되어지는 인터커넥터로는 광섬유가 있는데, 이때 입출력부분에서 전송을 위하여 전기적 신호의 변환이 필요하여 펄스/광, 광/펄스 변환 과정을 거치게 된다. 하지만 이 광섬유를 전 기적 인터커넥터로 바꾸어 이용하면 이러한 과정을 없앨 수 있으며, 이를 통해 데이터의 고속전송이 가능해 진다.<sup>2</sup>

이런 전기적 도파관의 종류에는 Coplanar strip Line(CPL)<sup>3</sup>, Metal pipe<sup>4</sup>, dielectric fiber<sup>5</sup> 등 다양한 종류가 있다. 하지만 이들은 차단주파수(Cut-off frequency)와 높은 손실, 혹은 높은 군속도분산(Group velocity dispersion)에 의하여 THz파를 전파하는데 있어서 효율적이지 못하다.

평행판 도파관(Parallel-Plate Waveguide)은 적은손실과 넓은 영역의 주파수영 역을 가지고 있는 것으로 알려져 있다.<sup>6</sup> 하지만 상판과 하판의 거리가 멀어지면 멀어질수록 다양한 전파모드가 발생하며, 평행판 도파관을 구부리는 것이 힘들 기 때문에 THz파를 전파하는데 있어서 제한적인 경로로만 이동 할 수 있는 점 은 자유도를 높게 요구하는 응용분야에서는 단점으로 다가 올 수도 있다.

단선 도파관은 적은 손실과 군속도분산이 거의 없는 특성을 보이지만, 모드 의 진행 형태가 방사형이라 일반적인 다이폴 안테나(Dipole antenna) 발신기에 는 낮은 커플링 효율(Coupling efficiency)을 보이며 굽힘 손실(Bending-loss)이 매우 크기 때문에 한정적인 실험 구성에만 사용 된다.<sup>7,8</sup>

본 연구에서 사용되어지는 이중 구리선 도파관(Two-wire lines waveguide)은 구리선에 의하여 진행되는 모드의 형태가 다이폴 안테나에 의하여 방사되는 필 드의 모양과 유사하여 단선 도파관에 비하여 높은 커플링 효율을 얻을 수 있으 며, 굽힘 손실 또한 단선 구리선 도파관과 비교하였을 때, 매우 적은 것을 알 수 있고 이중 구리선을 통하여 전파되는 THz 신호가 TEM 전파모드로 전파되 어 차단주파수가 존재하지 않는 것이 장점이다.<sup>9</sup> 이러한 특성은 인터커넥트 (Interconnect)나 실험구성의 자유도를 요구하는 응용분야에서 유용한 도파관으 로 활용 되어질 수 있다. 하지만 여기에는 실용적인 문제점이 존재한다. 전파모



드의 진행에 방해가 없이 구리선을 지탱하고, 각각의 구리선의 간격을 일정하 게 유지하는 점이다.

본문에서는 이중 구리선 도파관의 전파 특성과 굽힘 특성에 대하여 연구 하 였으며, 문제점을 보완하기 위한 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관을 제작하 였고 그 전파특성과 굽힘 특성을 연구 하였다. 또한 기존의 사용되어지던 결합 방식이나 고정 방식을 더 뛰어난 효율로 개선하는 연구를 진행 하였다.





### 제 2 장 본론

#### 2.1 이중 구리선 도파관

#### 2.1.1 실험 장치 구성



Fig. 2 이중 구리선 도파관의 기본 실험 장치 구성

Fig. 2는 본 논문에서 사용되는 실험 장치 구성과 이중 구리선 도파관을 도식 적으로 나타낸 것이다. Ti:sapphire laser에 발생된 짧은 펄스(파장:800nm, 펄스 폭 : ~60fs, 반복률 : 83MHz)가 격자(Grating), 광배분기(Beam splitter), 각각의 Mirror와 Delay line을 거쳐 각각의 송신기(Transmitter, Tx), 수신기(Receiver, Rx)의 광섬유로 전파 되게 된다. 이때 Grating을 사용하는 이유는 광섬유의 Core부분으로 펄스가 진행되게 되면 Core의 굴절률(Refractive index)에 영향을



받아 펄스폭이 넓어지게 되고, 이러한 현상을 Grating을 통하여 보상 할 수 있 기 때문이다. 실험에서 양단에 설치된 Delay line은 Rx 쪽은 신호를 측정하기 위함이고, Tx 쪽은 다양한 길이의 이중 구리선 도파관을 측정하기 위함이다. Tx(Silicon on sapphire, SOS, [10-30-10µm])의 10V 전압이 걸린 다이폴 안테나 에 광을 조사 하였을 때, THz파가 발생되고 그 발생된 파는 텅스텐 팁을 통하 여 효율적으로 결합(Coupling)되어 구리선 도파관에 전파 되고, 구리선 도파관 을 통하여 진행된 THz파는 다시 한 번 텅스텐 팁을 통하여 Rx(SOS, [10-30-10µ m])의 안테나로 전파된다. 이 THz파는 Rx로 조사되는 광에 의해서 검출되어진 다.



Fig. 3 (a) THz파 결합에 사용되어진 텅스텐 팁(팁의 끝부분은 1μm). (b) 다이폴 안테나 칩 위에 정렬되어진 텅스텐 팁.

기존의 이중 구리선 도파관에서는 THz파 결합을 위하여 팁(Tip) 구조를 이용 한 산란(scattering) 방식을 이용하였다. 하지만 이러한 방식은 그 효율이 매우 낮으며 대역폭 역시 좁은 단점이 있다.

이전의 단선 도파관 연구에서 결합 효율을 높이기 위해 사용되어진 텅스텐 팁 집적 결합 방식은 단선 도파관의 양 끝을 뾰쪽하게 만들어 칩에 집적 접촉 하는 방법이다. 이러한 구조는 전파되는 THz파를 도파관 끝에서 강하게 집속 시켜 도파관의 결합 효율을 증가 시킨다.<sup>10</sup>



Collection

Fig. 3(a)는 단선 도파관에서 사용되어지던 팁을 이중 구리선 도파관에 맞게 변형 시킨 것이다. 전체 길이가 30mm이며, 직경이 0.5mm에서 1um로 감소하 는 텅스텐 팁이 있고 그 끝을 휘어서 각각의 텅스텐 팁 끝의 간격을 60µm로 만들어 SOS칩의 안테나와 안테나 사이의 간격과 거의 일치 시켰다. Fig. 3(b)는 제작되어진 팁을 안테나의 다이폴에 위치(칩 보호를 위하여 텅스텐 팁과 칩 사 이에 5µm 간격이 존재함)하도록 조절하였다. 기존의 팁 구조를 이용한 산란 방 식과 비교 했을 때, 신호의 크기와 넓은 스펙트럼 영역 면에서 뛰어난 효과를 보이고 있다. 그 이유는 이중 구리선 도파관의 TEM 전송 모드의 필드 패턴이 다이폴 안테나에서 발생되는 필드 패턴과 매우 유사한데, 그것이 발생과 동시 에 바로 텅스텐 팁에 결합되기 때문이다.<sup>11</sup>

이러한 텅스텐 팁과 칩을 하나의 장치로 구성하였고, 또한 이 장치와 광섬유 를 하나의 스테이지 위에 두어 다양한 형태와 길이의 샘플에도 실험 구성의 변 화 없이 실험이 가능하게 하였다. 실험에 사용되어진 샘플은 직경 0.4mm (or 0.5mm)의 구리선이며, 이 샘플은 테플론 디스크에 의하여 고정되었고, 이중 구 리선 도파관과 텅스텐은 100µm이하의 공간을 가지며 결합되어 있다. 그 이유 는 칩과 집적 접촉 되어 있는 텅스텐 팁이 도파관 설치를 위한 과정에서 구리 선 도파관과 접촉이 발생하면 칩에 손상을 주기 때문에 이를 방지 하기위한 것 이다. 하지만 이러한 공간은 실험의 결과에 크게 영향을 주지 않는다. 이전의 단선 도파관 연구에서 두 도파관 사이의 공간이 증가함에도 불구하고 신호 크 기 감소율은 매우 낮은 것을 보여주고 있다. 구리선 도파관과 텅스텐 사이의 공간이 3mm에서 24mm로 증가하더라도 각각의 첨두치간의 값은 50%에서 80%로 상대적으로 매우 작은 감소를 보이고 있다. 이러한 이유는 각각의 떨어 진 텅스텐 팁과 이중 구리선 도파관의 전파모드가 같아서 도파관사이에 공간이 존재하더라도 손실 없이 잘 결합되기 때문이다.<sup>10</sup>

#### 2.1.2 테플론 고정대의 형태에 따른 효율

다양한 도파관을 제작 후, 자신이 원하는 장소에 사용하기 위해서는 도파관 을 지탱해 줄 고정대(Holder)가 꼭 필요하다. 평행판 도파관, 동축 케이블 같은 경우에는 외부의 환경에 어느 정도 차폐 되어 있기 때문에 장치 구성에 큰 어 려움이 없고, 빛을 전달하는 광섬유의 경우도 cladding에 의하여 대부분의 빛 이 core 부분으로만 이동하고 추가적으로 피복에 의하여 보호 받고 있기 때문 에 외부의 환경에 거의 영향을 받지 않는다. 하지만 단선 도파관, 이중 구리선 도파관 등 전달하고자하는 신호가 외부에 노출되어 있는 경우에는 상황이 틀리 다. 고정대의 모양, 소재에 따라서 신호의 크기, 군속도 분산 등 다양한 부분에 영향을 받기 때문이다. 또한 구리선 도파관의 길이가 길어지면 구리선 간의 간 격유지가 어려워지며, 이는 전파모드의 변형과 흡수율의 변화로 나타날 수 있 기 때문에 이중 구리선 도파관의 구간마다 이를 지탱하여줄 고정대가 반드시 필요하다.

THz영역에서 비교적 투명하다고 여겨지는 물질에는 석영, 사파이어, 고저항 실리콘, 테플론 등이 있다. 석영 및 사파이어는 송수신기 칩의 기판 제작에 이 용되어지며, 고저항 실리콘, 테플론은 THz파를 접속시켜주는 렌즈, 윈도우 또 는 고정대에 많이 이용된다. 본 논문에서 고정대의 소재로 사용되어진 테플론 (PTFE)은 내화, 내열, 내한성이 좋아서 -100°C ~ +260°C까지 사용할 수 있다. 흡수율 낮고 불연성이며, 전기 절연성도 양호하다. 이러한 소재의 특징을 이용 하여 집적 부속품을 만들어 기계에 사용하거나, 테플론 코팅을 통하여 다양한 제품의 보강재로써의 역할도 한다. 또한 테플론은 경도가 무른 편이여서 특별 한 제조 공정 없이도 다양한 형태로 쉽게 제작이 가능하다.<sup>17</sup>

이중 구리선 도파관에서 대부분의 THz파는 구리선과 구리선 사이에 강하게 집속 된다. 이때 구리선 사이에 공기가 아닌 다른 물질이 존재하면 THz파의 일부는 반사가 되고 일부는 투과하여 진행 되며 전파모드에 영향을 미치며, 그 물질의 흡수율에 의하여 THz파의 크기가 감소된다.



- 7 -



Fig. 4 테플론고정대의 다양한 형태에 따른 Reference와 Sample의 크기 비

Fig. 4는 전파되는 THz신호의 크기감소를 최소화하며 도파관을 고정하기 위 하여 다양한 형태로 제작되어진 테플론 고정대의 모양과 그 모양의 Reference 와 Sample의 측정값 비를 나타낸 것이다. Reference는 Fig. 2의 실험구성과 같 고, Sample은 Fig. 2의 Cu wire중간에 3mm 두께의 테플론 고정대를 추가 한 것이다. Fig. 4의 오른쪽에 위치한 그림과 같이 5종류의 형태로 테플론 고정대 가 제작 되었으며, 주황색은 이중 구리선 도파관을 뜻한다.

앞에서 설명한 것과 같이, 이중 구리선 도파관에서의 THz파의 전송모드는 Fig. 5와 같다. 중앙의 검은색 원은 구리선 도파관을 의미하며 외부는 공기로 이루어져있다. 구리선 사이에 THz파가 강하게 집속되며 구리선 바깥으로도 일 부의 THz파가 진행된다.<sup>18</sup> 이렇게 전파되는 THz파가 손실이 적은 공기 중으로 최대한 전파되게끔, Fig. 4의 2-5번 고정대와 같이 구리선 사이에 테플론이 존 재하지 않는 고정대를 설계하였고, 1번 고정대는 이전의 단선 도파관에서 사용 되어지던 구리선의 모든 영역을 테플론을 덮고 고정시키는 형태이다.





Fig. 5 (a) 이중 구리선 도파관의 전파모드의 시뮬레이션 그림 (f=0.2THz) (b) 테플론 고정대의 형태에 따른 시뮬레이션 크기 비

2-4번의 고정대는 전체적인 형태는 같지만, 구리선을 지지하는 테플론의 접촉 부분의 모양이 조금씩 틀리다. 2번은 구리선의 2/3을 덮고 있는 형태이며, 3번 은 1/2, 4번은 구리선의 한 면과 단순히 접촉이 되어 있는 형태이다. 2번 고정 대는 테플론의 너무 많은 부분이 구리선을 덮고 있기 때문에, 구리선의 표면에 가깝게 진행하는 0.15THz 이상의 고주파에는 많은 감소가 있는 것을 확인 할 수 있고, 3, 4번 고정대는 2번의 단점을 보안하기 위하여 와이어 간의 접촉면적 을 점점 줄여서 진행되는 THz파의 고주파 부분이 상당히 개선 된 것을 볼 수 있다. 하지만 4번 고정대의 경우는 고정대가 구리선을 지탱하여 주지 못하기 때문에 실용적인 면에서 단점이 존재한다. 또한, 이중구리선 도파관에서 THz파 는 구리선 사이 이외에도 구리선 바깥쪽으로 전파하는 THz파가 존재하기 때문 에 일부 테플론의 접촉 부위에 의하여 그 크기감소가 발생하는 것을 볼 수 있 다. 5번의 고정대는 구리선의 위, 아래와 중간부분을 공기로 두고 THz파의 전 파경로에서 상대적으로 신호의 집속이 작다고 생각되어지는 구리선의 옆 부분 을 고정대와의 접촉면으로 두었다. 하지만 이 경우, 그림 Fig. 5(a)와 같이 구리



선 사이의 신호 부분이 구리선 지름보다 좌우로 더 넓은 면적의 공간을 차지하 며 전파 되고, THz파의 많은 부분이 테플론 디스크에 의해 영향을 받게 되어 손실이 커지게 된다. 이러한 손실들의 전반적인 원인은 임피던스(impendence) 불일치의 영향이 크다. 공기와 테플론의 임피던스 차이로, 진행되던 THz모드가 변형되며 손실이 발생하는 것으로 볼 수 있다.

Fig 5, 6의 측정값과 시뮬레이션 값을 비교 하여 보면 전체적인 경향이 잘 일 치함을 볼 수 있다. 이 때 가장 좋은 결과는 갖는 고정대의 형태는 구리선 전 체를 완전히 감싸고 있는 테플론 고정대의 형태이다. 물론 공기 중으로 전파하 는 THz파가 아주 최적의 상태이기는 하지만 고정대가 없는 이중 구리선 도파 관은 현실적으로 불가능 하다. 따라서 THz파가 전송되는 구리선 주위의 모든 부분을 테플론으로 두어 앞서 언급한 임피던스 일치가 잘되어 어느 정도 반사 와 흡수 손실은 존재하지만, TEM 전파모드로 모드의 변형 없이 잘 전파되는 것을 의미한다. 하지만 시뮬레이션 값과 데이터 값에는 차이가 보인다. 0.4THz 에서 데이터 영역의 크기 비는 0.75정도이지만, 시뮬레이션 값에서는 0.9정도를 보이고 있다. 이런 결과는 시뮬레이션 상에서는 구리선이 테플론에 의하여 완 벽하게 둘러싸여 있지만, 실험상에서는 테플론에 완벽한 구멍을 만들 수 없고, 또한 구리선을 테플론으로 고정시키는 과정에서 구리선이 테플론을 변형시키기 도 한다. 따라서 구리선과 테플론 사이에는 작은 공기층들이 존재하게 되고, 이 는 구리선 표면을 따라 전파되는 고주파에 영향을 끼치게 되어 손실이 발생하 게 된다. 이러한 부분들은 정교한 고정대 제작 과정을 거치면 넓은 대역폭의 THz파가 90% 이상 전송되는 뛰어난 효율의 고정대를 제작 할 수 있다.

Fig. 6은 1번 고정대의 Reference와 Sample의 측정값을 나타낸 것이다. 시간 영역의 Sample의 원래의 값은 3mm 두께의 테플론의 굴절률(n≒1.44)만큼 지연 되었지만 크기감소의 정확한 비교를 위하여 각각의 시간영역 데이터의 최고점 을 동일 시간으로 이동하였다. 스펙트럼 영역에서 0.1THz 아래의 부분은 Sample의 손실이 거의 없어 Reference와 일치하지만, 0.1THz 이상의 영역에서 는 앞서 설명한 이유로 손실이 발생하는 것을 볼 수 있다.



테플론 디스크 고정대는 아주 적은 손실로 이중 구리선 도파관을 지탱할 수 있다는 것을 실험과 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 하지만 이러한 형태의 고정대는 긴 거리의 이중 구리선 도파관에 적용하기에는 설치 상에 어려움이 따르기 때문에, 설치의 용이성과 약간의 손실 부분을 개선한다면 이중 구리선 도파관의 장거리 송신분야에도 유용하게 사용 되어 질 수 있을 것이다.



Fig. 6 구리선 전체를 감싼 테플론 디스크의 시간, 주파수 영역 측정값



2.1.3 이중 구리선 도파관의 전파 특성



Fig. 7 도파관의 길이에 따른 시간영역에서의 THz파 신호크기 및 신호 폭

각각 125mm, 210mm, 380mm, 720mm, 길이가 2배씩 증가하는 직경 0.4mm 구리선 샘플을 만들어 두고, Fig. 2에서의 구리선 도파관을 교체하며 실험을 진 행하였다. 그리고 이 길이의 차에 따른 신호의 지연 현상은 Tx쪽의 Delay line 을 조절하여 보상하였다.

Fig. 7(a)—(d)는 이중 구리선 도파관의 시간 영역 신호다. 각각 신호의 군속 도분산은 무시 할 만큼 작다. 또한, 이중 구리선 도파관의 THz신호의 첨두치는 125mm에서 720mm 길이로 도파관의 길게 늘였음에도 불구하고 오직 55%의 감소율을 보였다. 이러한 비율은 기존의 측정되어진 동축케이블과 비교 하였을 때, 상당히 적은 신호 감소율을 보이고 있다.<sup>12</sup> 또한, 길이가 증가함에도 불구하 고 신호 자체의 왜곡 없이 안정적으로 전파되는 것을 볼 수 있다.

모든 그림의 메인 신호 뒤에는 아주 작은 신호가 나온다. Fig. 7(b)의 약 28ps 위치에 작은 화살표로 표시되어진 신호의 원인은 실험 장치의 구성상 THz파를



발생시키기 위하여 칩의 뒷면에서 광을 조사 하도록 되어져 있기 때문이다. 이 때 칩의 내부에서 다중 반사(Multiple reflection)가 발생하게 되는데, 칩의 굴절 률(n ≒ 3)과 칩 내부의 다중 반사 거리에 해당하는 900µm 위치에서 그림과 같은 작은 신호가 발생하게 되는 것이다.

측정값에서 중요하게 봐야할 것은 길이에 따른 신호의 크기 감소이다. 크기 감소의 정도는 exp[-aL]로 간단히 표현 할 수 있는데, 그 감소율(a)은 a = 0.014/cm이다. 이것으로 우리는 560pA의 신호가 200cm를 진행 하였을 때, 560×exp[-2.8] = 34pA로 감소하는 것을 예상 할 수 있다. Fig. 7(d)의 삽입 그림 은 720mm의 THz파 신호의 Y축을 -10~10pA로 단위를 변경한 그림이다. 현재 의 실험 구성에서 시간 영역의 잡음은 ±1pA 이하로 매우 작으므로 장거리 전 송 시 쉽게 메인신호를 구분해 낼 수 있다.



Fig. 8 (a) 이중 구리선 도파관의 길이에 따른 주파수영역에서의 크기 값.

(b) 도파로의 크기 흡수율 (실선 : 이중 구리선 도파로의 흡수율 이론값, 점
 선 : 평행판 도파관의 흡수율 이론값, 빨간색 원 : 이중 구리선 도파로의 흡수율 실험값)

Fig. 8(a)는 이중 구리선 도파관의 길이별 주파수 영역이다. 길이가 증가함에 따라 전체적으로 감소를 보이고 있다. Fig. 8(b)에는 이중 구리선 도파관의 흡수 율을 나타내었다. 그 흡수율은 다음의 식으로 나타내었다.

$$\alpha = -\frac{1}{L} ln(\frac{A(\omega)}{A_0(\omega)}) \tag{1}$$

위의 식에서 A<sub>0</sub>(ω), A(ω)는 각각 125mm와 380mm의 주파수영역 크기 값을 의미하며, L은 도파관의 길이차를 의미한다. 이중 구리선 도파관의 흡수율 비교 를 위하여 이중 구리선 도파관의 흡수율 이론값(실선), 평행판 도파관의 흡수율 이론값(점선)을 두었다. 실험적 흡수율은 0.1THz 에서 0.01/cm 로 매우 낮지만 어느 정도 이론값과 실험값의 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이것은 이중 구리 선 도파관이 장거리 송신을 위하여 길어질 경우, 구리선 사이의 간격이 변화하 며 추가 적인 손실이 생기는 것이 그 이유이다. 또한, 추가적인 손실은 평행판 도파관<sup>13,14</sup>과 Zennack THz 표면파 측정에서도 관측되어지는데<sup>15,16</sup>, 이는 얇은 표면층에서의 금속의 전도도(Conductivity)의 감소로 설명되어진다. 또 다른 가 능성은 누설 모드의 방사손실로 생각 할 수 있다.

기존의 테플론 디스크 고정 방식은 구리선 보다 지름이 작은 구멍을 뚫어 고 정시키는 방식인데, 이 방식은 구리선에 장력을 주는 것에는 한계가 있다. 따라 서 이 문제점 개선을 위하여 테플론 디스크를 절반으로 쪼개어 최종적으로 나 사를 이용하여 고정하는 방식을 이용하였다. 이 방식은 테플론 디스크가 구리 선에 높은 장력을 줄 수 있어 장거리의 이중 구리선 도파관을 가능하게 하며, 나사에 의해 고정되므로 테플론 디스크와 구리선 사이의 공기층을 최대한으로 줄일 수 있어 그에 의한 손실을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이전 의 이중 구리선 도파관은 텅스텐 팁과 직경의 차이가 있어 신호의 감소가 발생 하였는데, 이러한 손실을 방지하기위하여 직경 0.5mm의 구리선을 이용하였다. Fig. 9는 새로운 고정대를 이용한 이중 구리선 도파관의 시간영역을 나타낸



- 14 -

것이다. 비교를 위하여 3종류의 장거리 이중 구리선 도파관의 샘플을 두었다. 200cm의 길이의 도파관을 통과하였을 때, 신호의 반치폭은 1.8ps로 짧은 거리 의 도파로 신호와 비교하여 신호의 늘어짐과 왜곡이 거의 없고, 신호의 첨두치 값의 변화도 매우 적다. 이러한 시간영역의 주파수를 고속 푸리에 변환을 통하 여 주파수 영역을 그림 Fig. 10(a)에 나타내었다. 이때, 21cm 와 200cm 도파로 의 주파수 크기 값을 선택하여, 앞서 구한 크기 흡수율 식을 통하여 그 흡수율 을 Fig. 10(b)에 나타내었다.



Fig. 9 새로운 고정대를 이용한 이중 구리선 도파관의 THz파 시간영역.





Fig. 10 (a) 새로운 고정대의 이중 구리선 도파관의 주파수영역. (b) 기존의 도파관과 새로운 고정대를 이용한 도파관의 흡수율.

## RIMEUN

기존의 이중 구리선 도파관(빨간색 원)관 새로운 고정대를 이용한 도파관(파 란색 원)을 비교하면 0.1 THz에서 흡수율이 0.01/cm에서 0.005/cm 로 확실히 감소한 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 새로운 고정대를 이용하여 장력을 증가시켜 구리선의 간격을 일정하게 유지한 것이 그 이유이다.

또한 2000mm 길이의 이중 구리선 도파관을 통과한 THz 신호의 위상의 일정 함을 보여주기 위하여, 210mm 의 위상정보와 2000mm의 주파수 크기 값을 이 용하여 역 푸리에 변환한 데이터를 Fig. 11(a)에서 보여주고 있다. 비교를 위하 여 Fig. 9(c)에서 보인 실험을 통하여 얻은 2000mm 도파로의 시간영역 데이터 를 Fig. 11(b)에 두었다. 두 신호를 보면 거의 유사함을 볼 수 있는데, 이는 위 상이 일정하고 낮은 분산을 갖고 있다는 것을 의미한다.

이러한 이중 구리선 도파관을 이용하면 실험을 통하여 증명한 것과 같이 2m 의 장거리 송신도 가능하며, 시스템 자체의 신호 잡음비가 뛰어 나기 때문에 그 이상의 거리도 충분이 전송 가능한 시스템이다.

Collection



Fig. 11 (a) 모든 길이에서 신호가 동위상임을 가정하여 계산 값으로 만들어 진 2000mm 도파관의 THz파 시간영역.

(b) Fig. 9(c)에서 측정된 THz파 시간영역 신호.







Fig. 12 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성 조사를 위한 실험 구성

이중 구리선 도파관의 장점은 도파관 형태 구성의 자율성에서 있다. 평행도 파관의 경우 특성상 굽힘(Bending)이 힘들고, 단선 도파관의 경우에는 굽힘이 발생할 경우 대부분의 THz파가 도파관을 따라가지 못하고 발산된다. 좁은 공 간에서 긴 길이의 전파경로를 원할 경우, 방해물에 의하여 도파관이 일직선으 로 진행이 힘든 경우 등 다양한 부분에서 이중 구리선의 굽힘 특성은 유용하게 사용되어 질 수 있다.

Fig. 12는 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성을 조사를 위한 실험 구성의 샘플 부분을 나타낸 것이다. 나머지 부분의 실험 구성은 Fig. 2와 같다. Fig. 12의 Rx 부분의 빨간색 점선으로 된 부분은 모든 실험 부품이 하나의 판 위에 있으며, 이 판은 구리선에 굽힘을 주기위해 매뉴얼 스테이지(manual stage)위에 위치해 있다. 구리선 중앙에 위치한 테플론 디스크는 구리선이 굽혀졌을 때, 구리선의 간격이 벌려지는 것을 방지하고, 테플론의 무게에 의하여 구리선이 일정한 방 향으로 휘어지는데 도움을 준다. 구리선을 고정하는 테플론 고정대 간의 간격 을 이전의 실험과 같은 170mm로 두었고, 굽힘 깊이(Curve depth) 또한, 이전 의 단선 도파관과 비교를 위하여 실험에서 사용되어진 굽힘 깊이인 0, 0.8, 1.3





Fig. 13 굽힘 깊이에 따른 시간영역에서의 THz신호 변화.

기존의 단선 도파관에서는 굽힘 깊이가 증가할수록 THz파의 첨두치가 급격 하게 감소되며 반치폭(FWHM) 또한 매우 넓어짐을 이전의 실험을 통하여 확인 하였다. 단선 도파관이 29mm의 굽힘 깊이를 가질 경우, 굽힘이 없는 직선의 단선 도파관과 비교하여 3.6ps의 반치폭 증가, 신호의 시간적 지연과, 전체 대 역폭이 0.25THz로 감소하는 등 도파관 굽힘에 대해서는 여러 가지 단점을 가



지고 있다<sup>7</sup>.

Fig. 13은 이중 구리선 도파관의 시간 영역이다. 명확한 구분을 위하여 Y축으 로 나누어 표시하였다. Fig. 13의 아래에 위치한 2.9cm의 굽힘을 가진 도파관의 측정값을 보면, 직선의 경우와 비교하여 약 50%의 첨두치 값을 유지하고 있으 며, 반치폭도 0.66ps만 증가하였고, 굽힘에 의한 시간적 지연은 1ps 미만이었다. Fig. 14(a)는 굽힘 깊이에 따른 주파수 영역을 나타낸 것인데, 0.1THz이하에 서는 거의 손실이 없는 것을 확인 할 수 있고, 2.9cm의 굽힘 깊이를 가지더라 도 0.5THz 정도의 상대적으로 넓은 대역폭을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 14(b)는 이전의 단선 도파관과 수치적으로 비교하기 위하여 각각의 첨두치 를 평준화 시켜서 그림과 같이 나타내었다. 단선 도파관의 경우에는 THz파의 크기의 감소가 급격하지만 이중 구리선 도파관의 경우에는 상대적으로 완만한 크기 감소율을 보이고 있다. 최종적으로, 2.9cm의 굽힘 깊이를 가진 도파관을 진행한 신호의 크기 값을 비교하여 보면 단선은 원신호의 20%, 이중 도파관은 원신호의 58% 정도의 크기 값을 전송하였다. 이러한 결과는 이중 구리선 도파 관의 굽힘 손실 면에서 우수한 특성을 증명해 준다.



Fig. 14 (a) 이중 구리선 도파관의 주파수 영역.(b) 단선, 이중 구리선 도파관의 첨두치 비교.



- 20 -

2.1.5 이중구리선 도파관의 굽힘 특성을 이용한 THz파 분배기



Fig. 15 이중 구리선 도파관을 이용한 THz파 분배기

이중 구리선 도파관의 굽힘 전파 특성은 단선 도파관의 굽힘 손실에 비하여 약 1/3정도로 그 손실이 매우 적다. 이러한 특성은 일반적으로 평행판 도파관, 단선 도파관 등에서 단점으로 여겨지던 제한적인 경로 구성을 보완하여 다양한 분야로의 응용 가능성을 열어 주었다.

Fig. 15는 이중 구리선 도파관을 이용한 THz과 분배기(Splitter)의 실험 구성 을 나타낸 것이다. 기존에 사용되어지던 지름 0.4mm구리선을 이용하였다. 내부 의 구리선은 길이가 210mm 이며, 외부 도체의 길이는 190mm 이다. Tx칩에서 발생된 THz신호가 텅스텐 팁을 통하여 내부 구리선으로 전파하게 되고, 20mm 진행 후에는 외부 도체가 위치해 있고 내, 외부 도체가 각각의 도체중심으로부 터 1mm의 간격을 유지하며 신호를 Rx까지 전파하게 된다. 이때 도파관의 중 심부에서는 굽힘이 존재하는데 그 굽힘의 각도는 21°이다. Tx와 Sample은 고정 되어 있고 Rx는 Labjack을 이용하여 #1, #2 출력을 측정하였다.

Tx칩에 발생되어진 THz파는 텅스텐 팁을 통하여 구리선으로 전파하게 되고 내, 외부 도체가 만나기 직전의 구간은 기존의 구리선 도파관의 전파 모드와 같이 두 구리선 사이에 강하게 집속되어 전파되어진다.

- 21 -





Fig. 16 이중 구리선 분배기의 시간, 주파수 영역

이후 내, 외부의 구리선 도체가 일정한 간격을 유지한 도파관으로 THz파가 진행 하게 되면 내, 외부의 구리선 도체가 또 하나의 이중 구리선 도파관을 형 성하여 기존의 도파관과 비교하여 약간 높은 에너지가 외부로 진행되게 된다. 이때 도파관이 THz파 분배를 위하여 상, 하로 나누어지며 중심으로 강하게 집 속되어 진행하던 THz파 신호가 공기 중으로 발산하게 된다. 이때 발산 되는 일부의 신호가 상, 하에 위치한 도파관으로 재결합 되고 이후의 전파경로에서



의 전파모드는 기존의 이중 구리선 도파관과 같이 진행되게 된다.

Fig. 16은 이중 구리선 분배기를 통하여 전파한 THz신호의 시간영역과 주파 수 영역을 나타낸 것이다. Reference는 같은 길이의 일직선의 이중 구리선 도파 관이다. (a)의 그림에서 보면 #1과 #2의 신호가 Reference 신호와 비교하여 위 상이 반대로 뒤 집혀 있는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 5(a)의 시뮬레이션 그림 을 보면 내, 외부의 THz가 위상이 반대인 것을 쉽게 확인 할 수 있다.<sup>9</sup> 이중 구리선 분배기가 두 가지의 경로로 나누어지기 전까지는 THz신호의 많은 부분 이 내부의 도체를 중심 도파관으로 진행하지만, 분배기가 두 갈래로 나누어진 뒤에는 위상이 반대인 외부도체의 경로를 중심으로 따라가기 때문이다.

Fig. 16(b)에서는 (a)의 THz파 신호에 해당하는 주파수 영역의 크기를 나타내 었다. #1과 #2의 값을 합친 값을 보면, Reference와 비교하여 전체적으로 절반 정도의 크기 값을 갖고 있다. 이 크기의 감소는 중심부에서 외부의 중심도체로 넘어 갈 때, 발산에 의한 손실이 대부분이며, 일부분은 #1, #2의 구리선 도체에 의한 손실이 이중으로 더해진 것도 있다. #1, #2의 주파수 크기 값은 기존의 신호에 비하면 매우 작지만 0.2THz까지는 꽤 많은 정보를 갖고 있으며 각각의 출력 단으로 거의 유사한 크기 값으로 분배가 되었다. 이것은 각각의 휘어진 각이 21°로 일정함에 의한 것이다. 만약 이 휘어진 각을 비율적으로 조절을 한 다면 5:5 THz파 분배기 뿐만 아니라 6:4, 7:3등 다양한 비율의 분배기로 응용이 가능할 것이다.



2.2 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관

2.2.1 실험 장치 구성



Fig. 17 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 실험 구성

이중 구리선 도파관을 긴 거리에 이용할 때, 일정한 간격을 유지하는 것은 매우 힘들다. 간격의 변화에 따라 전파모드의 형태가 변하거나 전파손실이 증 가 할 수 있기 때문에 간격유지는 중요한 부분이다.<sup>18-20</sup>

이전의 실험에서 테플론 고정대의 다양한 형태에 따른 손실에 대해서 연구하 였다. 이때 가장 뛰어난 성능을 보였던 것은 구리선 전체를 감싼 형태인데, 이 는 긴 거리의 이중 구리선 도파관에 적용하기에는 제작 상에 상당한 어려움이 있기 때문에, 이러한 점이 보완된 다른 형태의 고정대가 필요하다.

이 실험에서는 이중 구리선간의 간격 유지를 위한 고정대를 찾기 위하여, THz영역에서 흡수율이 매우 적은 테플론튜브와 그 속의 도체의 형태에 따른 특성, 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성을 실험을 통하여 확인



하였다.

Fig. 17은 전체적인 실험 구성은 Fig. 2와 같고 Cu wire 부분만 Sample로 교 체하여서 실험을 진행 하였다. 실험에서 사용되어진 테플론튜브의 소재는 PTFE이며 각각 150µm의 두께를 가진 얇은 테플론막이 도체를 덮고 있는 형태 이다. 도체의 종류에는 19가닥의 구리선으로 이루어진 총 지름 0.4mm의 연선 (stranded wire)도체와 지름 0.4m의 구리선 도체가 사용되었다.





2.2.2 도체에 따른 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 특성



Fig. 18 각각 다른 도체를 가진 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관.

실험에서 사용된 테플론 튜브는 각종 미사일 유도 무기의 전원 및 신호전달 케이블, 또는 인공위성, 항공 및 의료장비용 신호전달 케이블로 사용되는 상업 용 평면 케이블이다. Fig. 18(a)는 연선을 포함한 원래의 평면 케이블, (b)는 기 존의 연선 도체를 0.4mm 구리선 도체로 교체한 사진을 보여주고 있다.

Fig. 19는 70mm길이의 이중 구리선 도파관, 테플론 코팅된 이중 구리선, 연 선 도파관의 시간영역, 주파수 영역을 나타낸 것이다. Reference는 앞서 사용된 이중 구리선 도파관의 일반적인 신호의 모습이고, 테플론 코딩된 도파관의 신 호는 전체적으로 높은 군속도분산이 발생하였다. 테플론 코팅된 도파관을 비교 하면 연선 도체를 이용한 도파관이 구리선 도체를 이용한 도파관에 비하여 약 간의 시간지연이 더 발생되고, 크기도 더 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 연선 의 도파관으로 진행되는 신호가 연선 구조에 의하여 구리선 주변으로 THz파가 강하게 집속되고 그에 따라 테플론 튜브의 영향을 많이 받기 때문이다.

테플론 코딩된 도파관의 군속도분산에 대한 가장 큰 원인은 테플론 튜브의 영향이다. 파장이 긴 저주파는 공기 중으로 많은 부분이 전파되고, 상대적으로



파장이 짧은 고주파 대역은 테플론 코딩된 도파관에 근접하여 전파되기 때문에 신호의 꼬리가 길어지는 것이다.



Fig. 19 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 시간, 주파수영역.

주파수 영역의 모든 영역에서 손실이 큰 연선은 이중 구리선 도파관의 도체 로는 적합하지 않다. 연선을 도체로 이용한 단선 도파관의 경우, 직경이 커지면 차단 주파수(Cut-off frequency)와 군속도분산에 의하여 신호의 꼬리가 더욱더 길어지기 때문에 연선의 활용 범위는 더욱더 제한된다.<sup>21</sup> 구리선 도체를 이용한 앞서 설명한 것과 같이 고주파는 테플론의 영향을 많이 받고 저주파는 상대적 으로 덜 받으며 공기 중으로 많은 부분이 전파되기 때문에 TEM모드의 전체에 서 임피던스가 일정하지 않아 발생하는 손실에 의하여 전체적으로 감소는 발생



하지만 저주파 영역에서는 충분한 에너지가 존재하기 때문에 신호의 늘어짐과 손실부분을 개선 한다면 응용분야에 충분히 활용될 수 있다.







Fig. 20 길이에 따른 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 시간, 주파수 영역.



Fig. 20(a)는 각각의 길에 따른 신호의 구분을 위해서 Y축을 이동한 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 길이별 측정값이다. 테플론 튜브의 영향에 의해 서 Fig. 20(a)에서 보이는 시간영역은 높은 군속도분산을 보여주고 있다.

Fig. 20(b)는 측정된 신호 주파수영역 크기 값을 보여주고 있다. 그림에서도 볼 수 있듯이 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관을 통과하는 주파수가 높아질 수록 흡수율도 이에 비례하여 증가한다.<sup>12</sup> 펄스의 꼬리부분 역시 테플론의 길이 에 비례하여 길어지기 때문에 측정시간도 함께 길어진다. 하지만 주파수 영역 의 크기 값은 여전이 많은 정보를 가지고 있다.



Fig. 21 테플론 코팅된 도파관과 공기 중으로 전파되는 도파관의 측정값을 이용한 상대적 크기 흡수율.

앞서 실험되어진 공기 중으로 전파되는 도파관에서 주파수 크기 값과 본 장 에서 실험된 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 주파수 크기 값을 이용하여 이전의 수식(1)에 대입하여 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 상대적 크기

- 30 -



흡수율을 구할 수 있다. Fig.21에서 흡수율은 모든 길이에서 유사한 값을 나타 내고, 이것은 측정값이 상당히 신뢰할 만 하다는 것을 의미한다. 380, 720mm의 길이의 흡수율은 0.4THz까지 표현되었는데, 이유는 Fig. 20(b)에서 확인할 수 있듯이 고주파에서 에너지가 매우 적어 오류 항이 많기 때문이다.



Fig. 22 (a) 다양한 종류의 도파관의 크기 흡수율 비교.(b) (a)의 Y축을 0에서 0.04까지 표시한 그래프.



Fig. 22는 측정 되어진 도파관의 종합적인 비교를 위하여 흡수율을 나타낸 것 이다. 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 흡수율(상대적 크기), 테플론의 크 기 흡수율, 그리고 이중 구리선 도파관의 이론적, 실험적 크기 흡수율을 나타내 었다. 비교를 위해 이중 구리선 도파관과 1mm 간격을 가진 평행판 도파관의 이론적 크기 흡수율을 나타내었다. 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 상대 적 크기 흡수율은 테플론으로 채워진 동축 케이블보다는 작지만, 이중 구리선 도파관과 단선 도파관의 흡수율보다는 훨씬 크며,<sup>7,12</sup> 앞서 설명한 공기층에 의 한 추가적인 손실에 때문에 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 흡수율은 테 플론 자체의 흡수율 보다 크다.

이중 구리선 도파관의 TEM 전파모드에 대한 흡수율은 유사한 조건을 가진 동축 케이블과 평행판 도파관 비교를 통하여 해석되어진다.<sup>12,22</sup> 비교를 위하여 사용되어진 이중 구리선 도파관의 구조는 0.4mm의 지름을 갖고 각각의 구리선 의 중심으로부터의 거리는 1mm이다. 이중 구리선 도파관의 이론적 크기 흡수 율은 1.0mm의 간격을 가진 구리로 이루어진 평행판 도파관에 비하여 1.7배 크 다. 지름 0.4mm의 내부 도체와 내부 도체의 표면으로부터 1.0mm 떨어진 외부 도체를 가진 동축 케이블의 경우는 평행판 도파관보다는 크기 흡수율이 1.86배 크다. 이 같은 도파관의 이론적 흡수율은 Fig. 22에서 보는 것과 같이 주파수의 제곱근에 비례한다.

이중 구리선 도파관의 크기 흡수율은 각각 125, 380mm의 길이의 도파관 측 정값을 식(1)에 대입하여 구할 수 있다. L항에는 두 도파관의 길이차를 넣는다. 이 도파관에는 테플론 튜브가 없기 때문에 크기 흡수율은 테플론 코팅된 도파 관보다 훨씬 작다. 하지만 이 값은 이론적 계산 값 보다 약 2.5배 크다. 이러한 오차는 앞서 설명한 것과 같이, 실제 실험상의 도파관 장력의 차이에 의하여 발생하는 것이 주요하며, 이는 테플론을 이용한 고정대의 고정방식의 변화로 개선 할 수 있다.

비록 측정된 값의 경향이 주파수가 증가함에 따라서 흡수율이 증가 하지만, 0.1에서 0.4 THz까지 비교적 많은 신호 크기를 가지고 있다.



- 32 -



Fig. 23 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 굽힘 실험 구성

Fig. 23은 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 굽힘 특성을 조사하기 위한 샘플 부분을 나타낸 것이다. 굽힘이 있는 테플론의 길이는 앞선 굽힘 실험들과 같이 170mm의 길이를 두었다. 빨간색 점선 안의 실험 장치들은 이전의 이중 구리선 도파관의 실험과 같이 한 스테이지 위에 올려있어 굽힘 실험을 위하여 Rx를 이동 시켰을 때, 굽힘 이외의 외부적인 요건들이 실험의 결과 값에 영향 을 미치지 않도록 하였다. Fig. 24(a)는 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 굽 힘 깊이에 따른 시간영역 측정값이다. 전체 측정값에서 상당히 높은 군속도분 산이 존재 하지만, 굽힘이 깊어짐에 반하여 신호의 변화는 극히 적다. 오히려 직선과 굽힘이 있는 도파관을 비교하였을 때, 굽힘이 있는 도파관에서 신호가 커지는 현상을 보인다. 그 이유는 구리선과 테플론 튜브 사이에는 작은 공기층 이 존재하는데, 구리선 도파관을 따라 이동하는 THz파가 테플론 튜브와 공기 층을 통과하며 손실이 발생 된다. 이때, 도파관에 힘을 가하여 굽힘이 발생하면 구리선과 테플론튜브 사이의 공기층이 줄어들게 되고 이에 의해 감소되던 THz 파의 크기가 증가하게 되는 것이다. Fig. 24(b)는 주파수영역을 나타낸 것이다. 굽힘이 발생하면서 빨간색으로 표시된 Reference(굽힘 깊이 : 0mm)에 비하여



크기가 증가 한 것을 볼 수 있고, 굽힘 깊이가 점점 커지더라도 크기의 변화가 거의 없어, 테플론 튜브에 의하여 굽힘 손실이 상당히 보완된 것을 알 수 있다. 저주파영역에서 아주 큰 피크 값이 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 신호 의 꼬리부분에서 생기는 일렁임에 의하여 발생된 것이다.



Fig. 24 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 시간, 주파수 영역





Fig. 25 360도 회전한 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관 실험 구성 사진

Fig. 25은 170mm 길이의 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관을 360도 회전시 켜 THz파를 전파한 실험 구성 사진이다. 도파관은 50mm 직경을 가지고 회전 하였으며 Tx와 Rx는 도파관경로 간섭을 피하기 위하여 11mm의 높이 차를 두 었다. 회전에 의하여 발산되어지는 THz신호가 공기 중으로 전파하여 Rx로 전 송되는 것을 막기 위해 Rx측의 고정대 위에 구리선의 공간을 제외하고 차단막 을 두어 이를 방지하였다.

Fig. 26은 Fig. 25의 측정값의 시간, 주파수 영역이다. Reference는 테플론 코 팅된 이중 구리선 도파관을 굽힘없이 일직선으로 구성한 것이다. Fig. 26(b)의 Reference와 회전된 도파관의 대역폭을 보면 전체적으로 크기가 상승 한 것을 볼 수 있다. Fig. 24(b)의 대역폭 크기 증가량과 비교하여 더 큰 증가량을 보인 다. 앞서 언급한 테플론 튜브와 구리선 사이의 공기층이 360도 회전에 의하여 도파관의 길이 중 상대적으로 많은 부분의 공기층 사라졌기 때문이다. 이러한 단점을 보완 한다면 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 전파 특성을 개선 할 수 있을 것이다.



Collection



Fig. 26 360도 회전한 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관의 시간, 주파수 영역



### 제 3 장 결 론

본 논문에서는 이중 구리선 도파관의 다양한 특성들을 서술하였다. 기존의 이중 구리선 도파관에서 THz파를 결합시키기 위하여 사용되어지던 산란방식의 결합법 대신 다이폴 안테나에서 발생하는 방사패턴과 유사하게 텅스텐 팁 배치 하여 효율적으로 THz파를 결합, 검출 하였다.

다양한 형태의 테플론 디스크 실험으로 효율이 뛰어난 고정대를 제작하여 기 본적으로 넓은 대역폭과 효율이 좋은 실험 장치를 구성을 하였다.

본 논문에서 사용되어진 이중 구리선 도파관의 경우 이론상의 값에 비하여 2.5배정도 손실이 크지만, 200cm이상의 장거리를 이동한 신호도 충분이 검출 할 수 있는 안정성을 갖고 있으며, 고정대의 개선을 통하여 이론값과 매우 근 접하며 높은 효율성을 구현 하였으며, THz파의 장거리(200cm) 송신을 실험으 로 증명하였다.

이전에 실험 하였던 단선 도파관의 굽힘 깊이와 같이 이중 구리선 도파관을 굽혔음에도 불구하고, 최대 깊이인 2.9cm에서 단선 도파관의 신호크기에 비하 여 약 3배에 가까운 전송 능력을 보였다. 앞선 테플론 디스크를 이용한 고정대 의 단점을 보완하기 위해서 테플론 튜브를 이중 구리선 도파관에 적용하였다. 상업적으로 사용되어지는 테플론 튜브는 150µm 두께의 테플론 막이 도체를 둘 러싸고 있는 형태이다. 테플론 코팅된 이중 구리선 도파관은 상당히 높은 군속 도분산과 손실이 발생하게 되는데 그 이유는 저주파 영역은 많은 부분이 공기 중으로 전파하는 반면, 구리선 표면으로 가깝게 진행하는 고주파영역은 테플론 튜브의 영향을 많이 받아 두 가지 매질의 임피던스 불일치에 의한 결과다. 테 플론 이중 구리선 도파관을 굽혔을 경우 특이한 점이 발생하게 된다. 직선일 경우보다 굽힘이 발생하였을 때, 전체적인 신호의 크기가 커진다는 것인데, 그 이유는 테플론 튜브와 구리선 사이의 공기층에 있다. 이 공기층과 테플론 튜브



과 구리선 사이의 공기층이 감소하고 이에 의하여 손실들이 줄어드는 것이다. 만약 이중 구리선 도파관의 실용적인 문제점인 효율이 뛰어난 고정대의 부재가 해결 된다면 다양한 분야에 활용 되어 질 수 있을 것이다.





### 참고문 헌

[1] Pasternack Enterprises, Inc., Irvine, California, 92623. Web Address; www.pasternack.com

[2] P. W. Coteus, J. U. Knickerbocker, D. H. Lam, and Y. A. Vlasov, "Technologies for exascale systems" IBM J. Res. and Dev. Vol. 55, No. 5, pp. 14:1-14 (2011).

[3] Yutaka KADOYA, Masayuki ONUMA, Shinji YANAGI, Tetsuya OHKUBO, Naoko SATO, Jiro KITAGAWA "THz wave propagation on strip lines: Devices, properties, and applications" Applied Electromagnetics and Communications, 19th International Conference on (2007).

[4] R. W. McGowan, G. Gallot, and D. Grischkowsky, "Propagation of ultra-wideband short pulses of terahertz radiation through submillimeter-diameter circular waveguides," Opts. Lett., 24, 1431, (1999).

[5] Li-Jin Chen, Hung-Wen Chen, Tzeng-Fu Kao, Ja-Yu Lu, and Chi-Kuang Sun, "Low-loss subwavelength plastic fiber for terahertz waveguiding" Ops Lett., Vol. 31, Issue 3, pp. 308-310 (2006).

[6] R. Mendis and D. Grischkowsky, "Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses," Opts. Lett., 26, 846, (2001).

[7] T.-I. Jeon, J. Zhang, and D. Grischkowsky, "THz Sommerfeld wave propagation on a single metal wire," Appl. Phys. Lett., 86, 161904 (2005).

[8] K. Wang and D. M. Mittleman, Nature, "Metal wires for terahertz wave guiding," Journal: Nature , vol. 432, no. 7015, pp. 376-379, (2004).

[9] M. Mbonye, R. Mendis, and D. M. Mittleman, "A terahertz two-wire waveguide with low bending loss," Appl. Phys. Lett., 95, 233506 (2009).



[10] Y. B. Ji, E. S. Lee, J. S. Jang, S.-H. Kim and T.-I. Jeon "Coupling Properties of a Conical Tungsten-Wire Waveguide in the Terahertz Frequency Range" J. Korean Phys. Soc, Vol. 53, No. 2, August (2008).

[11] D. Grischkowsky, "Optoelectronic Characterization of Transmission Lines and Waveguides by THz Time-Domain Spectroscopy," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol.6, pp. 1122-1135 (2000).

[12] T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "Direct optoelectronic generation and detection of sub-ps-electrical pulses on sub-mm-coaxial transmission lines," Appl. Phys. Lett., 85, 6092 (2004).

[13] N. Laman and D. Grischkowsky, "Reduced Conductivity in the THz Skin-Depth Layer of Metals," Appl. Phys. Lett. 90, 122115 (2007).

[14] A. J. Shutler and D. Grischkowsky, "Gap independent coupling into parallel plate THz waveguides using cylindrical horn antennas," accepted for publication in J. Appl. Phys. August 29, (2012).

[15] M. Gong, T.-I. Jeon and D. Grischkowsky, "THz surface wave collapse on coated metal surfaces," Opt. Exp., 17, 17088, (2009).

[16] T.-I. Jeon, and D. Grischkowsky, "THz Zenneck surface wave (THz surface plasmon) propagation on a metal sheet," Appl. Phys. Lett. Vol. 88, 061113 (2006).

[17] 기계공학 용어사전, KDR (1995.3.1)

[18] H. Pahlevaninezhad, T. E. Darcie, and B. Heshmat, "Two-wire waveguide for terahertz," Opts. Exp., 18, 7415, (2010).

[19] H. Pahlevaninezhad and T. E. Darcie, "Coupling of terahertz waves to a two-wire waveguide," Opts. Exp., 18, 22614, (2010).



[20] P. Tannouri, M. Peccianti, P. L. Lavertu, F. Vidal, and R. Morandotti, "Quasi-TEM mode propagation in twin-wire THz waveguides," Chinese Opt. Lett., 9, 110013, (2011).

[21] A. I. Fernández-Domínguez, C. R. Williams, F. J. García-Vidal, L. Martín-Moreno, S. R. Andrews, and S. A. Maier, "Terahertz surface plasmon polaritons on a helically grooved wire," Appl. Phys. Lett. 93, 141109 (2008).

[22] S. Ramo, J.R. Whinnery and T. van-Duzer, "Fields and Waves in Communication Electronics," (John Wiley & Sons, Inc. Third Edition, New York 1993). See page 250.



