

2013년 2월
석사학위 논문

광섬유 간섭계를 이용한 다중모드
광섬유 대역폭 측정에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

광 기 술 공 학 과

김 찬 영

광섬유 간섭계를 이용한 다중모드 광섬유 대역폭 측정에 관한 연구

Study on Bandwidth Measurement of Multimode Optical Fiber
using Optical Fiber Reflectometry

2013년 2월 25일

조 선 대 학 교 대 학 원

광 기 술 공 학 과

김 찬 영

광섬유 간섭계를 이용한 다중모드 광섬유 대역폭 측정에 관한 연구

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2012년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

광 기 술 공 학 과

김 찬 영

김찬영의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 부교수 김 현 수 (인)

위 원 조선대학교 조교수 권 민 기 (인)

위 원 조선대학교 조교수 안 태 정 (인)

2012년 11월

조 선 대 학 교 대 학 원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이 론	3
제1절 다중모드광섬유	3
제2절 기존의 대역폭 측정 기술	10
1. RF spectrum analysis method	10
2. Time-of-flight method	10
3. Optical frequency domain reflectometry(OFDR) method	12
4. Optical low-coherence reflectometry(OLCR) method	12
제3절 모드간 분산을 이용한 광섬유 대역폭 측정	18
1. RZ코드와 NRZ코드의 정의	18
2. 광섬유 대역폭 측정 방법	18
3. Bit rate Capacity 및 3-dB Bandwidth	19
제4절 모드간 분산 측정 원리	22

제3장 실험 및 결과	27
제1절 간섭계 시스템 개발	27
1. 투과형 광 간섭계 개발	27
2. 3dB Optical Coupler 기반 반사형 광 간섭계 개발	28
3. Optical Circulator 기반 반사형 광 간섭계 개발	28
제2절 측정 스펙트럼 영역에 따른 노이즈 영향	35
1. 안정적인 스펙트럼 영역 확인	35
2. 광원의 안정성이 모드간 분산 측정에 미치는 영향	36
제3절 OSA와 Mini-Spectrometer의 비교	40
제4절 모드간 분산의 위상 해석	46
제5절 분해능	49
1. 수치적 분해능	49
2. 실질적 분해능	50
제6절 샘플 길이별 모드간 분산 측정	52
제7절 MMF의 대역폭 측정	57
제4장 결론	59

[참고문헌]

[감사의글]

그 립 목 차

그림 2.1 광섬유를 진행하는 모드의 종류-----	5
그림 2.2 광섬유의 수광각-----	6
그림 2.3 V-number에 따른 각 모드들의 normalized propagation constant -----	7
그림 2.4 MMF의 종류-----	8
그림 2.5 모드분산에 의한 신호 왜곡-----	9
그림 2.6 RF spectrum analysis을 통한 대역폭 측정 기술에 대한 개념도-----	13
그림 2.7 Offset에 따른 고차모드 형성 개념도-----	14
그림 2.8 Time-of-flight 방법을 이용한 다중모드광섬유의 대역폭 측정 장치 개략도--	15
그림 2.9 본 연구실에서 개발된 DMD 측정 시스템의 메인 화면-----	16
그림 2.10 OFDR 기술을 이용한 대역폭 측정 장치의 개략도-----	17
그림 2.11 통신 신호 체계 분류 (RZ와 NRZ)-----	20
그림 2.12 기존의 다중모드광섬유 대역폭 측정법-----	21
그림 2.13 두 경로로 진행하는 빛에 의한 간섭-----	25
그림 2.14 역탄젠트 함수와 관련된 극좌표계-----	26
그림 3.1 모드간 분산 측정을 위한 광섬유 간섭계 종류별 모식도-----	30
그림 3.2 Bare Fiber Connector를 이용한 임시 패치코드 제작-----	31
그림 3.3 투과형 광 간섭계의 파장 분포-----	32
그림 3.4 각 측정계별 모드간 분산 측정 결과-----	33

그림 3.5 안정화 영향 실험 모식도	37
그림 3.6 광원의 스펙트럼 및 초기 측정과의 오차	38
그림 3.7 파장 안정화 영향 비교	39
그림 3.8 OSA 및 Spectrometer의 사진 및 동작 원리	42
그림 3.9 OSA 및 Mini-Spectrometer 비교 측정 실험 모식도	43
그림 3.10 OSA와 Mini-Spectrometer를 이용한 측정 결과 비교	44
그림 3.11 반사형 계측기와 마이켈슨 간섭계를 혼합한 간섭계 모식도	47
그림 3.12 간섭 유무에 따른 측정값 비교	48
그림 3.13 마이켈슨 간섭계의 미세 경로차 영역에서의 모드간 분산	51
그림 3.14 FMF의 샘플 길이별 모드간 분산	53
그림 3.15 MMF의 샘플 길이별 모드간 분산	54
그림 3.16 샘플 MMF의 모드간 분산	58

표 목 차

표 3.1 측정 방식에 따른 측정 결과 및 손실률 비교	34
표 3.2 OSA와 Mini-Spectrometer의 성능 및 규격 비교	45
표 3.3 FMF 샘플 길이별 모드간 분산	55
표 3.4 MMF 샘플 길이별 모드간 분산	56

ABSTRACT

Study on Bandwidth Measurement of Multimode Fiber using Optical Fiber Reflectometry

Chan-Young Kim

Advisor: Prof. Tae-Jung Ahn, Ph.D.

Department of Photonic Engineering,
Graduate School of Chosun University

Local area networks (LANs) employing optical fibers are set up in apartments, offices, vehicles, and aircraft that require web browsing, document transmission, multimedia transmission, etc. Most optical fibers used in these applications are multimode fibers (MMFs) because they have a higher tolerance to bend loss than single mode fibers (SMFs). Further, they are easier to handle and cheaper than SMFs. The increasing demand in data transmission bandwidth requires us to check MMFs that are already installed for bandwidth. However, former measurement methods such as the RF spectrum analysis method and the time-of-flight method requires heavy equipment, hence are not portable. However, the optical frequency domain reflectometry (OFDR) method has equipment that is portable.

In this thesis, we demonstrate the measurement of bandwidth of multimode fibers by using OFDR. Broadband light passing through the multimode fiber causes phase differences, which are linear to the frequency; hence, an oscillating optical spectrum that has some periods relating to modal dispersion is obtained. We can thus obtain the modal dispersion by applying Fourier transform to the optical spectrum. Furthermore, for the first time, we also calculated the phase information of the Fourier transform to make modal dispersion reliable. This can help in accurately determining where dispersion occurred. Finally, we calculated the 3-dB Bandwidth,

which is often specified for optical fibers, using relations between modal dispersion and bitrate capacity, which is related to the 3-dB bandwidth directly.

제1장 서론

오늘날 광섬유를 이용한 근거리 통신이 대형 선박, 항공산업, 차량 네트워크 시스템 등에 활발히 이용되고 있다^[1,2]. 여기에 사용되는 광섬유는 다중모드 광섬유(MMF, Multimode Fiber)로써, 단일모드 광섬유(SMF, Single mode Fiber)에 비해 구부림 손실이 적고, 가격이 더 저렴하다는 장점을 갖고 있다^[3-6]. 전선을 이용한 전기적 통신이 발전했음에도 불구하고 광통신은 전자기파에 대한 영향을 거의 받지 않기 때문에 안정성을 요구하는 근거리 통신 분야에서 광통신을 이용하려고 한다.

전자장비의 발달로 인하여 근거리 네트워크에서 요구하는 전송 대역폭이 늘어나고, 그에 맞춰서 MMF의 대역폭 또한 지속적으로 개선 됐지만, 다중모드 전송을 기반으로 하는 MMF의 대역폭은 모드 분산(modal dispersion)에 영향을 받는다^[7,8]. 따라서 MMF를 제작하거나 기존에 설치된 MMF를 유지 및 보수 할 때에 모드분산을 측정할 장비가 필요하다. 하지만 기존의 측정 방식들은 부피가 크고 가격이 비싸서 현장에서 이를 측정하는 것이 불가능하다. 이를 위해서 본 연구에서는 휴대가 가능한 방식의 모드분산 측정기를 개발하였다.

최근 광통신의 비약적인 발전으로 인해 굉장히 많은 양의 정보를 주고받을 수 있게 되었다. 가정마다 100 Mbps급의 초고속 인터넷을 누리게 되었고, 단순히 컴퓨터 통신 뿐만 아니라 인터넷TV, 인터넷전화 등 크고 작은 용량의 콘텐츠를 사용할 수 있게 되었다. 최근 모바일 통신 역시 초고속 유선 인터넷에 준하는 속도를 제공하는 무선통신 기술이 개발되어 현재 서비스되고 있고, 그 수요 또한 급격히 늘어나는 추세이다. 이 때문에 통신 업계에서는 더 많은 양의 정보를 주고받을 수 있는 인프라 구축이 필요해졌다. 하지만 현재 통신을 하는 방식, 즉 단일모드 광섬유를 이용한 파장분할 통신의 대역폭이 한계에 다다르고 있다. 이러한 요구에 따라 최근 유럽에서는 MMF를 이용한 모드분할통신에 관한 연구가 활발해졌다^[9-14]. 이 연구가 성공적으로 이루어지면 기존 방식의 통신에 비해 2배 내지 4배, 혹은 그 이상의 대역폭을 가지는 통신이 가능해지므로, 이러한 연구의 상업적 가치 또한 높다.

현재 모드분할통신은 연구단계에 있는 만큼 다양한 구축 방법이 연구되고 있다. 그 중 대부분의 연구에서 모드분산을 언급하였는데, 모드분할 방식에 따라 매우 큰 모드분산을 요구하기도 하고, 매우 작은 모드분산을 요구하기도 한다. 이 때문에 모드분할 통신에 사용되는 광섬유를 제작하거나 상용화된 시스템을 유지·보수 할 때 모드분산

을 측정하는 기술이 필수적이다. 이를 측정하는 방법으로는 시간도메인의 측정법과 주파수도메인의 측정법이 있다^[15,16]. 시간도메인 측정법은 임의의 초고속 신호를 전송하여 신호의 왜곡 비율이나 형태를 분석하여 측정하며, 단점으로는 초고속 통신을 위한 기술인만큼 모드분산을 측정하기 위해 초고속 오실로스코프 등의 고가의 초고속 계측장비가 필요하다. 주파수도메인 측정법은 파장가변레이저나 넓은 스펙트럼을 가진 광원을 전송시켜 주파수도메인의 간섭주기를 푸리에변환을 통해 분석하여 모드그룹 간의 전파시간 차이를 구하는 방법으로써, 측정 가능한 모드분산 범위가 좁다는 단점이 있다. 하지만 이 방법은 시간도메인 측정법보다 시스템 구축 가격이 저렴하고, 측정 시스템을 휴대용 수준의 소형으로 제작 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 휴대가 가능한 방식의 MMF 모드분산 측정기를 구현하였고, 이것을 이용하여 대역폭이 알려진 MMF 샘플의 모드분산을 측정하여 비교하였다. 측정기의 소형화를 위해 스펙트럼 영역을 측정하기 위해 Optical Spectral Analyzer(OSA) 대신 상용화된 mini-spectrometer를 사용하였다. 이렇게 대체했을 때 측정 결과에 영향을 주는지 실험으로 확인하였다. 측정 광섬유 간섭계 구조로는 크게 투과형과 반사형으로 나뉘는데, 이중 반사형은 커플러형과 써큘레이터형이 또한 나뉜다. 이 세 종류의 간섭계 중에 투과 손실을 고려했을 때 어느 측정 방식이 적합한지 실험을 통해 확인하였다. MMF의 모드분산을 측정함에 있어 푸리에변환의 절대값 뿐만 아니라 실수부와 허수부의 위상분석을 통해 노이즈와 신호의 구분을 보다 손쉽게 할 수 있음을 확인하였다. 이 기준점을 정하기 위해 마이켈슨 간섭계를 구성하여 이론적인 모드간 분산 위치의 특성을 확인하였다. 마지막으로 마이켈슨 간섭계를 이용하여 모드간 분산에 따른 푸리에변환 분석 결과의 선형성을 확인하였다.

제2장 이 론

제1절 다중모드광섬유

광섬유는 빛을 진행시키는 Core 부분과, 그것을 싸고 있는 Cladding 부분으로 나뉜다. 이 둘의 굴절률 차이나 Core의 크기에 따라 빛이 진행할 수 있는 경로의 개수가 달라 지는데, 하나만 진행할 수 있는 광섬유를 단일모드 광섬유(Single Mode Fiber, SMF), 여러 경로로 진행할 수 있는 광섬유를 다중모드 광섬유(Multi Mode Fiber, MMF)라 한다. 광섬유의 조건에 따라 그림 2.1에 나타난 모드들 중에 일부가 해당 광섬유를 통과하게 된다. 단일모드는 LP_{01} 모드이며, 다중모드 광섬유는 다양한 모드들이 섞여있다. 이러한 기준을 수치적으로 나타내기 위해 V-number라는 값을 정의내렸는데, 이는 식 2.1과 같이 구할 수 있다^[1].

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (2.1)$$

여기서 a 는 코어의 반경, λ 는 파장, n_1 과 n_2 는 각각 코어와 클래딩의 굴절률이다. $\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 부분을 개구수(Numerical Aperture, NA)라 하는데, 이는 광섬유가 얼마나 큰 각도로 빛을 받아들일 수 있는지를 의미하는 수치로, 식 2.2와 같이 구할 수 도 있다.

$$NA = \sin(\theta_A/2) \quad (2.2)$$

여기서 θ_A 는 수광각(Acceptance Angle)으로, 그림 2.2에 나타나 있듯이 광섬유에 입사 될 수 있는 최대 각을 의미한다. 이렇게 구한 V-number를 이용하여 해당 광섬유에 어떠한 모드가 전파될 수 있는지 알 수 있다. 그림 2.3은 V-number의 변화에 따른 normalized propagation constant의 변화를 나타내고 있다. 여기서 b 는 normalized propagation constant라 하는데, 빛이 광섬유를 따라 얼마나 잘 진행하는지를 나타내기 위한 수치로써 0과 1 사이 값을 가진다. 하며 식 2.3을 통해 구할 수 있다^[1].

$$b = \frac{(\beta/k)^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$

여기서 β 는 굴절률을 포함한 파수 의미의 propagation constant이며, $b=0$ 인 경우 $\beta=kn_2$ 인 경우이며, 이는 빛이 클래딩으로 진행한다는 것을 의미한다. 반대로 $b=1$ 인 경우는 $\beta=kn_1$ 인 경우인데, 이는 빛이 광섬유의 코어로 진행한다는 것을 의미한다. 즉, b 가 0인 경우는 해당 모드가 전파되지 않음을 의미하고, b 가 0과 1 사이의 값을

갖는다는 것은 적당한 속도로 전파된다는 것을 의미한다. V-number가 2.405를 넘으면 다중모드 광섬유라 하는데, 그림 2.3에서 모드마다 normalized propagation constant가 다르기 때문에 모드간 분산이 일어나게 된다.

모드간 분산을 줄이기 위해 그림 2.4의 (b)와 같이 MMF의 코어부분 굴절률을 단계를 주어서 포물선 형태의 굴절률 분포를 가진 MMF를 만드는데, 이를 Graded-index MMF라 한다. Graded-index MMF에서도 모드간 경로차가 큰 것처럼 보이지만, 코어 가장자리 부분으로 갈수록 굴절률은 낮아지므로 그곳에서의 진행 속도는 빠르다. 따라서 모드간의 광 경로차는 적다고 볼 수 있다. 모드간 분산을 줄이기 하기 위한 굴절률 분포는 식 2.4와 같고, 모드간 분산을 최소화 하기 위한 조건은 식 2.5와 같다^[1].

$$n = n_1 [1 - 2\Delta (r/a)^\gamma]^{1/2} \quad ; r < a \quad (2.4a)$$

$$n = n_2 \quad ; r > a \quad (2.4b)$$

$$\gamma = \frac{4+2\Delta}{2+3\Delta} \approx 2(1-\Delta) \quad (2.5)$$

여기서 Δ 는 normalized index difference이며, 식 2.6과 같이 정의된다^[1].

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \approx (n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2 \quad (2.6)$$

그림 1.4와 같이 MMF에 시간상으로 짧은 펄스를 입사시켰을 때 광섬유 내에서 모드간의 전파 속도차에 의해 출력 신호는 퍼지게 된다. 이를 모드분산이라 한다. 그림 2.5는 Graded-index MMF에 ‘11101’ 이라는 디지털 신호를 전송시켰는데, 모드분산에 의해 ‘11111’ 이라는 신호로 왜곡된 상황을 설명해주고 있다. 만약 실제 광통신에서 모드분산에 의해 신호가 영향을 받는 속도로 통신을 하게 되면, 데이터 전송 시 오류가 많이 발생하게 된다. 모드분산으로 인해 전송 오류가 발생하면 그에 따른 문제가 발생하거나 데이터를 다시 전송해야 하는 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 MMF의 모드분산을 측정하여 적절한 속도로 통신하도록 해서 전송 오류가 일어나지 않도록 해야 한다.

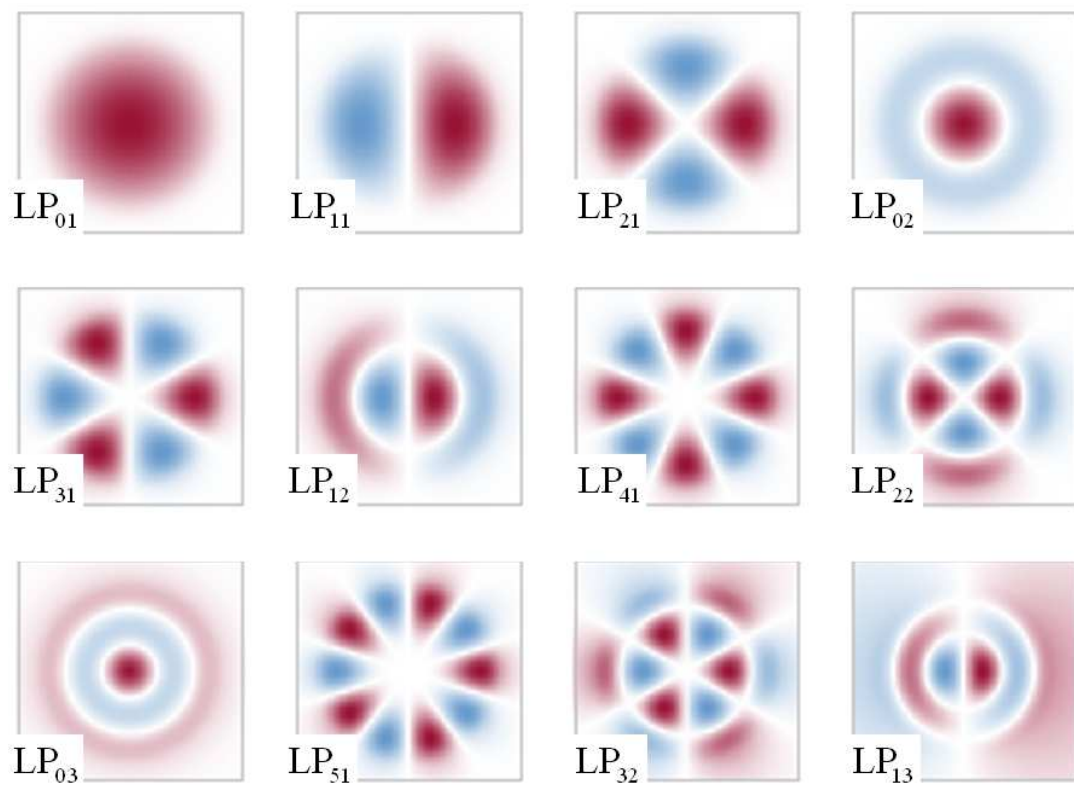


그림 2.1 광섬유를 진행하는 모드의 종류^[21]

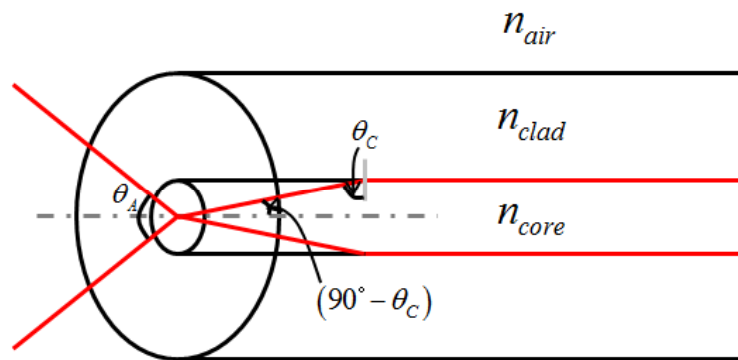


그림 2.2 광섬유의 수광각

b

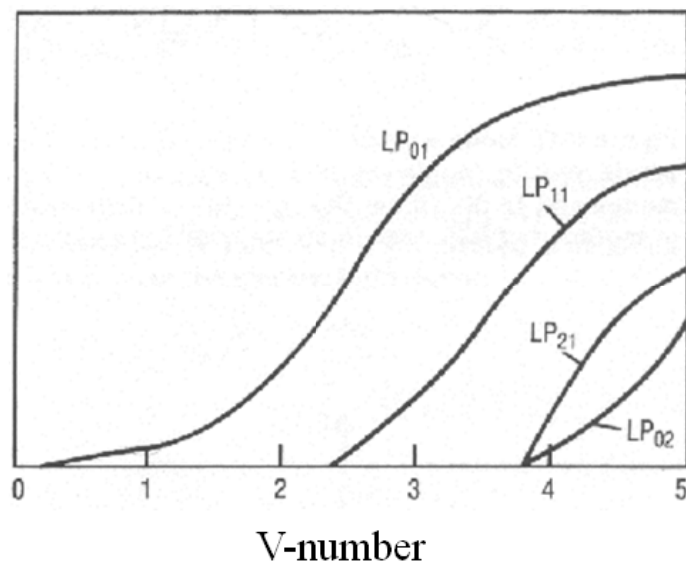


그림 2.3 V-number에 따른 각 모드들의 normalized propagation constant

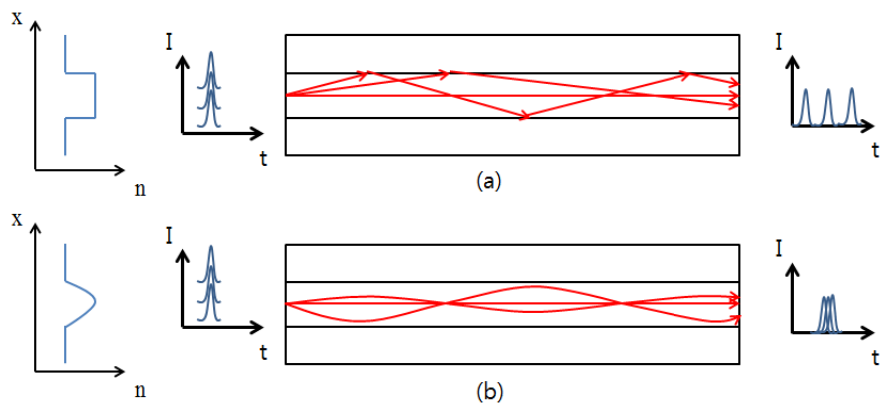


그림 2.4 MMF의 종류 (a) step-index MMF, (b) graded-index MMF

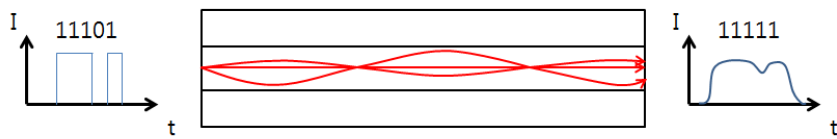


그림 2.5 모드분산에 의한 신호 왜곡

제2절 기존의 대역폭 측정 기술

모드분산을 측정하는 방법에는 RF spectrum analysis method, time-of-flight method, optical frequency domain reflectometry (OFDR), optical low coherence reflectometry 등 크게 네 가지 종류가 있다.

1. RF spectrum analysis method

일반적으로 MMF의 대역폭(bandwidth) 측정은 RF pattern generator를 통해 ‘101010...’ 과 같은 비트 신호를 생성하고, 이것을 측정하고자 하는 광섬유에 통과시켜 주파수 분석기(RF spectrum analyzer)를 통해서 주파수에 따른 신호의 세기 변화를 관찰한 후 광섬유의 대역폭으로 결정한다^[17]. 그림 2.6은 MMF의 대역폭을 측정하기 위한 구성도를 보여준다. DC 전류 발생 장치와 RF 신호 발생기를 이용하여 대역폭 측정에 필요한 신호를 생성한다. 또한, 650 nm의 중심파장을 갖는 레이저 다이오드를 사용하고 집광렌즈를 통하여 입사된 빛은 기준 광섬유와 테스트 광섬유를 각각 통과한 후 photo detector 및 RF spectrum analyzer에 의해 측정된다. Mode scrambler는 다중모드 광섬유에서 모든 모드를 발생시키기 위해 사용한다^[18]. Swept frequency에 따른 optical power의 주파수 응답을 구한다. 광섬유 대역폭은 zero 주파수에 대한 ‘1’ 과 ‘0’ 의 세기 차이보다 3-dB 감소하는 가장 낮은 주파수로 결정된다. 1 km 샘플에 대한 이 주파수를 3-dB Bandwidth라 하며, 단위는 MHz-km 이다.

2. Time-of-flight method

MMF의 대역폭은 MMF의 모드들이 얼마만큼의 상대적인 도파 속도(군속도, group velocity) 차이를 갖는지 측정함으로써 구할 수 있다. Differential mode delay(DMD)는 다중모드 광섬유의 여러 모드간의 군속도의 차이를 의미한다. 본 측정방법은 이미 표준화되어 기존 다중모드광섬유의 대역폭 측정에 널리 이용되고 있는 기술이다^[19].

이상적으로는 다중모드 광섬유의 모든 모드를 특성 짓고 (이를테면 LP 모드로) 각 모드의 군속도를 측정하는 것이 좋을 것이다. 그러나 실제적으로는 제한적으로만 각 모드들을 특성 지을 수 있다. 구체적으로 말해서 하나의 모드만을 여기시키는 입사조

건은 달성하기 무척 힘들다. 때문에 구현하기 좋고 정량화하기 쉬운 그리고 모드를 선택적으로만 여기시킬 수 있는 입사조건이 필요하다. 통상적으로 이것은 코어 사이즈가 작은 단일모드 광섬유(이하 probe fiber라 함)를 통해 다중모드 광섬유에 빛을 입사시키고 이때 단일모드 광섬유를 측정하는 다중모드 광섬유에 대해 평행하게 어긋남(이하 offset 혹은 radial offset)을 주는 방법에 의해 구현된다^[20]. 그림 2.7 참조.

이 방법은 probe fiber와 측정하는 다중모드 광섬유간의 offset 크기를 통해 정량화가 가능하고, 충분히 선택적인 모드를 여기하는 것이 가능하다는 점에서 좋은 방법이며 다중모드 광섬유의 DMD를 측정하는 방법으로 표준화되었다. 이제 이러한 입사조건에서 각 모드들의 군속도를 특성화하기 위해 짧은 duration을 갖는 광펄스를 입사시키고 측정대상 광섬유를 통과한 후에 반대쪽 끝에서 시간축에서 전송된 펄스를 관측하면 각 모드별 군속도 차이에 의해 펄스가 시간상에서 분리되어 보이게 된다. 이 DMD 값은 각 offset 위치에 대한 시간상의 output pulse를 그림 2.8과 같은 장치 구성을 이용하여 측정함으로써 얻어진다.

측정된 output pulse를 통해 유용한 실제적 값을 얻을 수 있다. 표준은 두 가지 값을 이용하도록 하고 있다. 먼저 output pulse를 통해 주어진 radial offset에 의해 여기된 모드들의 최대와 최저 군속도 차이를 얻는다. Offset 범위가 $[R_inner, R_outer]$ 사이일 때 이렇게 구해진 군속도 차이를 DMD Mask, $[R_inner, R_outer]$ 에서의 DMD로 정의한다. 반면에 얻어진 output pulse 데이터의 조합을 통해 실제 사용될 때의 레이저 광의 입사 조건을 조합할 수 있게 되는데 이렇게 얻어진 3-dB bandwidth를 calculated effective modal bandwidth(EMBc)라고 하며 이 값들 중에서 최저값을 min EMBc라 하며 사용할 수 있는 대역폭의 하한선으로 활용할 수 있다.

그림 2.9는 본 연구실에서 개발한 DMD 측정 시스템의 메인 화면을 보여준다. 각 offset에 대한 형성된 모드를 나타내며 이것을 통해 대역폭을 계산하게 된다. 하지만 이 방법은 사용되는 펄스폭의 제한으로 인해 측정하고자 하는 광섬유가 500 m 이상 길이를 가져야 측정이 가능하다. 즉, 분해능을 높이기 위해 펄스의 폭을 줄이거나 대역폭이 높은 photo detector를 사용해야 한다. 이렇게 되면 측정 시스템이 복잡해지고 가격이 더욱 높아지는 단점이 있다. 이 time-of-flight 방법은 앞의 RF spectrum analysis 방법과 같이 측정 시스템이 복잡하고 가격이 비싸 휴대용 대역폭 측정 장치 개발에 적합하지 않다. 이러한 분해능의 문제점을 극복하기 위해 최근에 분해능이 좋은 광섬유 간섭계를 이용한 DMD측정 기술을 본 연구자의 의해 제안되었으며 기존 광섬유의 측정 기술로 주목 받고 있다.

3. Optical frequency domain reflectometry (OFDR) method

본 기술은 그림 2.10에서 보는 것과 같이 파장가변레이저(tunable laser source, TLS)를 통해 파장 가변된 빛이 광섬유 간섭계를 통과하여 발생된 간섭을 통해서 다중모드 광섬유에서 발생된 모드를 시간상 분해하여 제일 빠른 모드와 느린 모드의 시간차이를 구하는 것이다. TLS의 경우 DFB-LD를 온도 변화를 주면서 쉽게 파장 가변을 할 수 있으며, photodetector(<1MHz)와 데이터 수집 장치(DAQ) 역시 저렴하게 구성할 수 있다. 본 측정 방법은 높은 분해능과 높은 광민감도를 제공하므로 짧은 길이의 MMF 측정에 가장 적합한 측정 방법이 될 것이다.

4. Optical low-coherence reflectometry (OLCR) method

이 측정 방법은 TLS 대신 넓은 파장 대역폭을 가진 광원(LED)과 파장 스펙트럼 분석기를 통해 간섭된 신호를 분해하여 DMD를 측정 하는 기술이다. 최근 850 nm 대역 기존 다중모드광섬유 10 m에 대한 대역폭을 측정하여 보고하였다^[8]. 본 기술은 앞의 기술들에 비해 분해능이 가장 좋아 아주 짧은 길이의 광섬유를 측정하는데 유용하며, 시스템 구축 비용도 저렴하여 휴대용 MMF 대역폭 측정 시스템 개발에 유용한 기술로 기대된다.

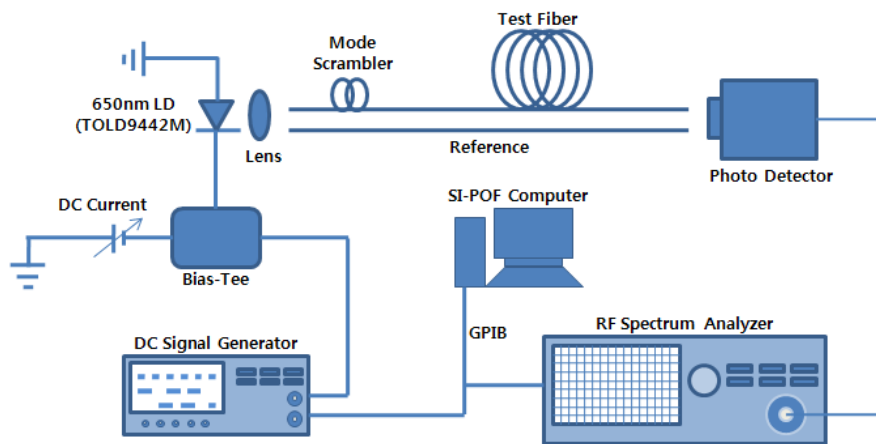


그림 2.6 RF spectrum analysis을 통한 대역폭 측정 기술에 대한 개념도

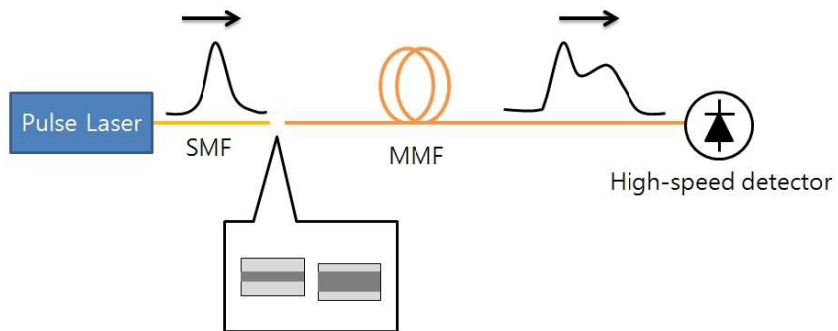


그림 2.7 Offset에 따른 고차모드 형성 개념도

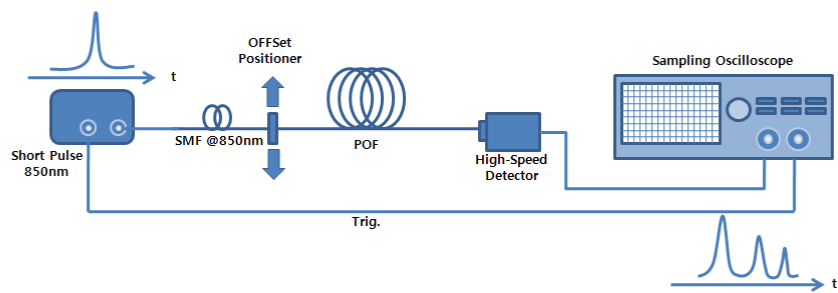


그림 2.8 Time-of-flight 방법을 이용한 다중모드광섬유의 대역폭 측정 장치 개략도

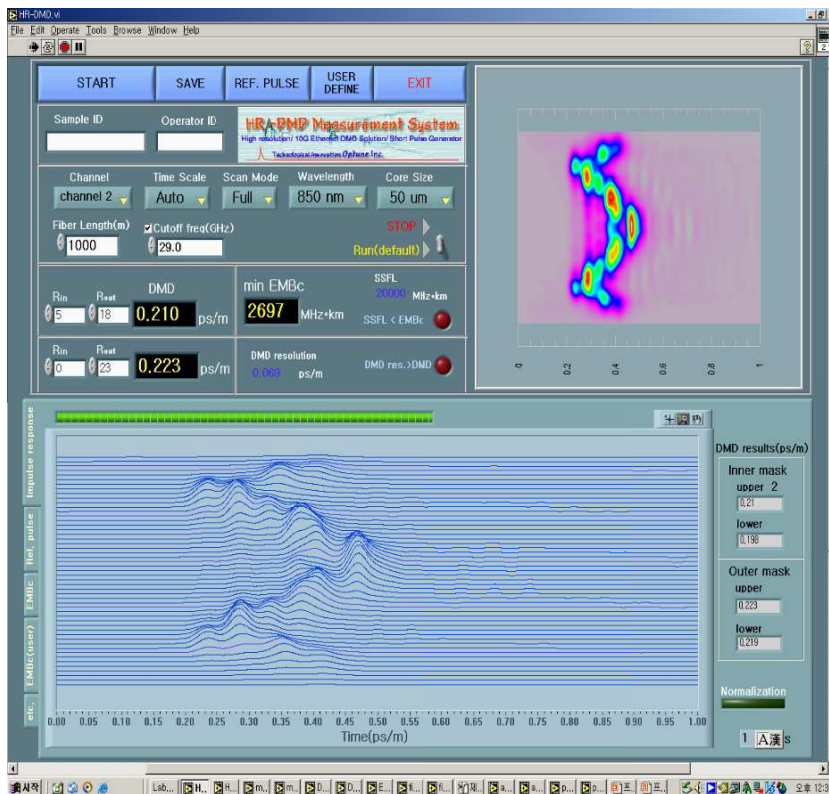


그림 2.9 본 연구실에서 개발된 DMD 측정 시스템의 메인 화면

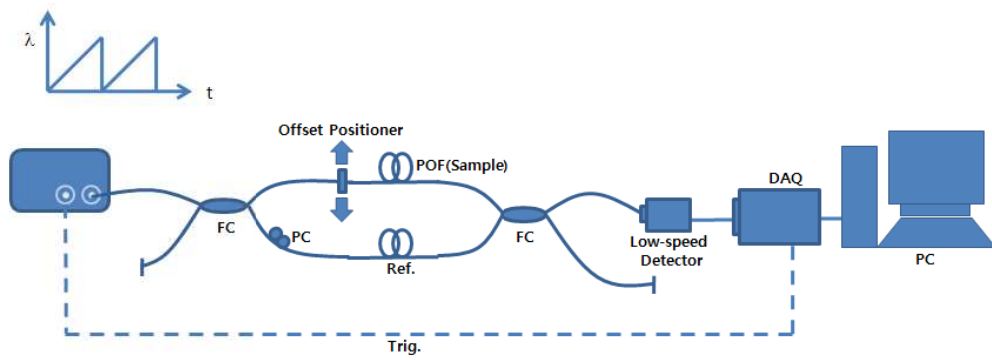


그림 2.10 OFDR 기술을 이용한 대역폭 측정 장치의 개략도

제3절 모드간 분산을 이용한 광섬유 대역폭 측정

광섬유를 이용하여 광통신을 할 때, 신호를 보내주는 쪽에서 아무리 좋은 신호를 보내준다고 하더라도, 광섬유에서 분산이 일어나기 때문에 신호가 왜곡 된다. 신호가 얼마나 왜곡 됐는지를 정형적으로 표현할 필요성이 있어서, 그 수치를 정형화 한 것이 바로 대역폭(Bandwidth) 이다. 이 수치의 정의는 신호가 광섬유를 1 km 진행한다고 할 때, 신호를 최대한 얼마나 빠르게 보낼 수 있는지를 나타내는 수치로서, 이 수치가 높을수록 같은 길이에서 빠른 신호를 주고받을 수 있음을 의미한다.

1. RZ코드와 NRZ코드의 정의

광섬유 대역폭의 산출방법을 소개하기에 앞서, 통신에서 사용하는 통신체계에 대해 소개하려 한다. 디지털 신호를 송수신 할 때 각 bit별로 ‘1’ 또는 ‘0’ 을 표현하여 전송할 수 있다. 그러나 어떤 경우에는 ‘1111...11’ 이나 ‘0000...00’ 등의 특수한 신호가 갈 수도 있는데, 이 경우 High-pass filter를 사용하면 두 신호를 구분할 수 없게 된다. 따라서 이러한 특수한 경우에는 매 bit마다 ‘0’ 신호를 반드시 넣어주는 통신 방식이 있다. 그래서 처음 소개한 통신 방식은 NonReturn to Zero(NRZ)방식이라 하고, 두 번째로 소개한 방식은 ‘0’ 으로 되돌아간다고 해서 Return to Zero(RZ)방식이라 한다. 그림 2.6은 이 두 통신 방식에 대한 설명을 하고 있다. RZ 코드의 경우 매 신호마다 0 신호를 추가로 넣어야 하므로, 일반적으로 NRZ 코드에 비해 2배 더 높은 대역폭을 요구한다. 우리가 측정할 대역폭은 ‘10101010...’ 의 NRZ코드를 전송하여 측정한다.

2. 광섬유 대역폭 측정 방법

광섬유에 임의의 신호를 넣어주면, 반대편에서는 일정한 손실이 생기고 신호가 관측된다. 이 때 입력 신호의 주파수를 점점 높여주면, 어느 순간부터 신호의 최대치와 최소값 차이, 즉 대비(Contrast)가 줄어들게 된다. 이 Contrast가 처음에 비해 절반으로 줄어들 때의 주파수를 f_{3dB} 라 하며, Bit rate Capacity (B) 와는 $f_{3dB} = 0.75B$ 와 같은 관계가 성립한다. 그림 2.7은 대역폭을 측정하는 기존의 방식을 나타내고 있다. 여기서 δ 는 앞서 설명한 Contrast에 해당한다.

3. Bit rate Capacity 및 3-dB Bandwidth

Bit rate Capacity란 신호왜곡이 생기지 않는 범위에서의 최고의 주파수를 의미한다. RZ코드와 NRZ 코드에 대한 Bit rate Capacity 계산 방법은 그림 2.11에 나타났다. 신호의 모양을 알 때에는 이러한 펄스 세기의 절반이 되는 지점의 폭, 즉, $\Delta\tau_{1/2}$ 을 가지고 Bit rate Capacity를 계산할 수 있다. 하지만 분산된 파형이 Gaussian 함수가 아닌 임의의 형태라면 최대한의 분산이 일어나는 폭 Δt 를 가지고 갈 수 밖에 없다.

대역폭은 1 km 광섬유를 통과할 때 신호왜곡 없이 전송할 수 있는 최대 주파수를 의미한다. Gaussian에 대해서는 $\Delta\tau_{1/2}$ 로, 알 수 없는 파형에 대해서는 최대 모드간 분산값인 Δt 를 이용하여 식2.1과 같이 Bit rate Capacity를 구할 수 있고, 식 2.8과 같이 대역폭을 계산한다^[22].

$$B \approx \frac{1}{\Delta t} \quad (2.7)$$

$$f_{3dB} = 0.75B \quad (2.8)$$

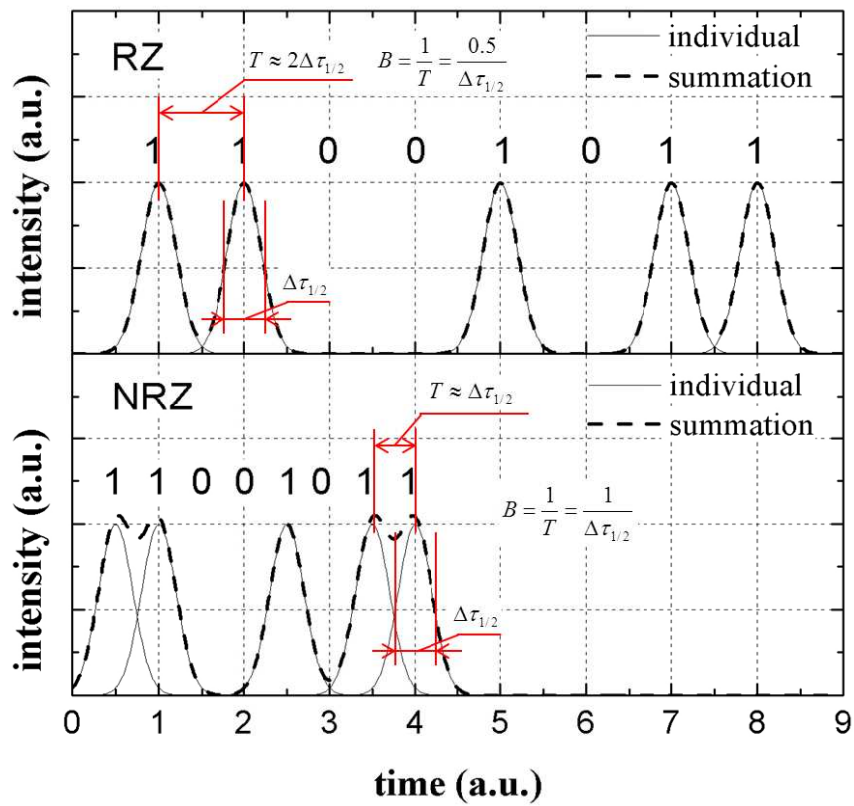


그림 2.11 통신 신호 체계 분류 (RZ 및 NRZ)

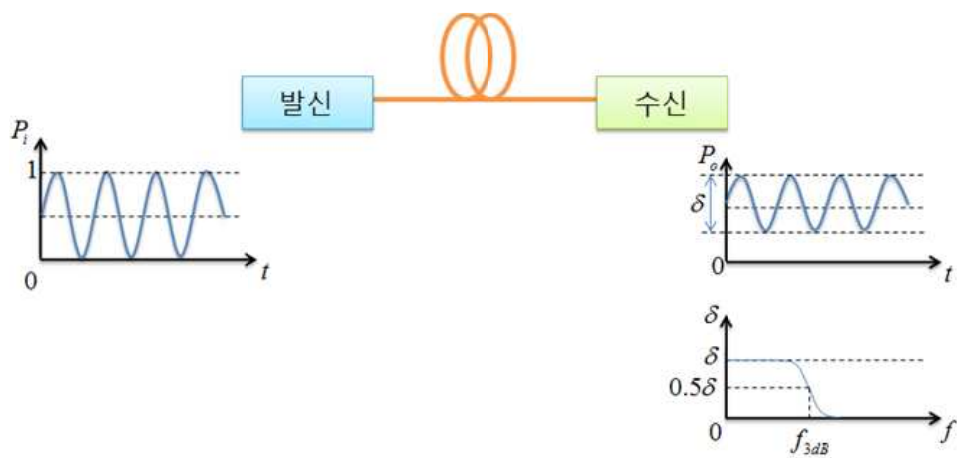


그림 2.12 기존의 다중모드광섬유 대역폭 측정법

제4절 모드간 분산 측정 원리

그림 2.13(a)와 같이 다중모드광섬유에 신호를 넣어주면, 모드간에 진행하는 속도가 달라서 분산이 일어난다. 이 때 Δt 만큼 시간차를 가지고 분산이 일어났다고 하면, 그들의 위상차는 $\Delta\phi = 2\pi f\Delta t$ 만큼 나게 된다. 만약 색분산이 없다고 가정하면, Δt 는 주파수 f 에 대해 상수라고 가정할 수 있으므로, 위상차 $\Delta\phi$ 는 f 에 비례해서 선형적으로 증가하게 된다.

그림 2.13(b)와 (c)에서 위상의 주기는 2π 이므로, 넓은 선폴을 가진 광원을 사용하거나, tunable laser를 사용할 경우 주기적으로 나타나는 간섭무늬를 관측할 수 있다. 이 간섭무늬의 df 를 푸리에 변환을 통해 구해내면, 우리가 원하는 Δt 를 구할 수 있다.

그림 2.13(d)와 (e)의 스펙트럼은 광스펙트럼분석기를 이용하여 측정할 수 있다. 어떤 경로차를 갖고 진행한 백색광의 스펙트럼을 측정하면 이와 같이 삼각함수 형태의 스펙트럼을 얻을 수 있다.

파장 분포의 주파수 분석을 할 때에는 주로 푸리에변환을 한다. 어떤 신호 $f(x)$ 의 주파수 ξ 성분이 얼마나 있는지를 구하고자 할 때 다음 푸리에 변환 식을 이용하여 그 세기를 구할 수 있다.

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi i x \xi} dx \quad (2.9)$$

OSA나 Spectrometer와 같은 장비를 이용하여 광 스펙트럼 분포를 얻으면 위와 같은 연속적인 정보를 얻을 수는 없다. 이 경우 Discrete Fourier Transform을 수행하며, 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi \frac{k}{N}n} \quad (2.10)$$

이렇게 얻은 주파수 성분 df 는 $\Delta t = 1/df$ 과 같이 역수만 취해주면 모드간의 시간차이를 계산해 낼 수 있다.

여기서 얻은 푸리에 변환값의 실수부와 허수부를 각각 a, b라 한다면 위상은 식 2.11과 같이 구할 수 있다. 이를 unwrap 하게 되면 제대로 된 위상 정보를 얻을 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1}(b/a) \quad (2.11)$$

위상 정보에 어떤 정보가 있을 수 있는지 알아보기 위해 간단한 조건에 대한 수식 전개를 해볼 수 있다. 두 빛이 경로차 Δt 를 갖고 진행한다고 했을 때 중첩된 두 전기장은 식 2.12로 표현할 수 있다.

$$E_{tot} = E_1 + E_2 = E_0(f)e^{j2\pi ft} + E_0(f)e^{j2\pi f(t - \Delta t)} \quad (2.12)$$

이 전기장을 주파수 f 에 대해 Δt 로 푸리에 변환을 해주면 식 2.13과 같이 정리되고, 만약 이 빛의 스펙트럼이 주파수 f 에 대해 상수, 즉 $E_0(f)=1$ 이라면 식 2.14와 같이 좀 더 간단해진다.

$$FT\{E_{tot}(f)\} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (E_0(f)e^{j2\pi ft} + E_0(f)e^{j2\pi f(t - \Delta t)})e^{j2\pi f\Delta t} df \quad (2.13)$$

$$FT\{E_{tot}(f)\} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} (e^{j2\pi ft} + e^{j2\pi f(t - \Delta t)})e^{j2\pi f\Delta t} df \quad (2.14)$$

여기서 f_{\max} 와 f_{\min} 은 각각 푸리에 변환에 사용된 주파수의 최대값과 최소값이다. 이를 풀어주면 식 2.15와 같이 실수부와 허수부가 나타나게 된다.

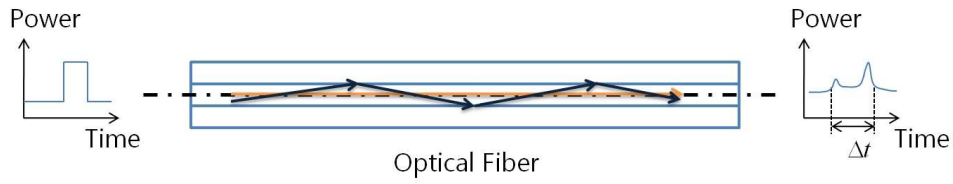
$$\begin{aligned} FT\{E_{tot}(f)\} &= A + Bj \\ A &= \frac{1}{\pi(t + \Delta t)} \cdot \cos(\pi(t + \Delta t)(f_{\max} + f_{\min})) \cdot \sin(\pi(t + \Delta t)(f_{\max} - f_{\min})) \\ &\quad + \frac{1}{\pi t} \cdot \cos(\pi t(f_{\max} + f_{\min})) \cdot \sin(\pi t(f_{\max} - f_{\min})) \\ B &= \frac{1}{\pi(t + \Delta t)} \cdot \sin(\pi(t + \Delta t)(f_{\max} + f_{\min})) \cdot \sin(\pi(t + \Delta t)(f_{\max} - f_{\min})) \\ &\quad + \frac{1}{2\pi t} \cdot \sin(\pi t(f_{\max} + f_{\min})) \cdot \sin(\pi t(f_{\max} - f_{\min})) \end{aligned} \quad (2.15)$$

A, B 각 항에 대해 $\lim_{t \rightarrow -\Delta t - 0} \{A\}$ 와 $\lim_{t \rightarrow -\Delta t + 0} \{A\}$ 를, 그리고 $\lim_{t \rightarrow -\Delta t - 0} \{B\}$ 와

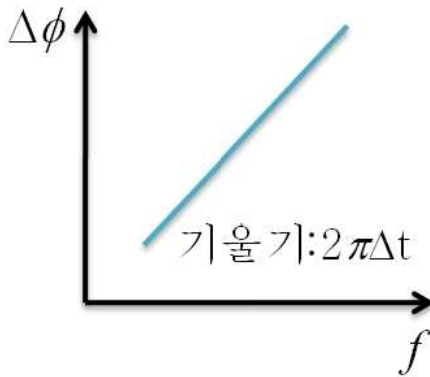
$\lim_{t \rightarrow -\Delta t + 0} \{B\}$ 를 비교하되, 비교할 때 의미가 있는 $\frac{1}{\pi(t + \Delta t)}$ 로 시작하는 항의 부호만을 비교해보면 식 2.16과 같다.

$$\begin{aligned}
\lim_{t \rightarrow -\Delta t - 0} \{A\} &= (-) \cdot 1 \cdot (-) = (+) \\
\lim_{t \rightarrow -\Delta t + 0} \{A\} &= (+) \cdot 1 \cdot (+) = (+) \\
\lim_{t \rightarrow -\Delta t - 0} \{B\} &= (-) \cdot (-) \cdot (-) = (-) \\
\lim_{t \rightarrow -\Delta t + 0} \{B\} &= (+) \cdot (+) \cdot (+) = (+)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

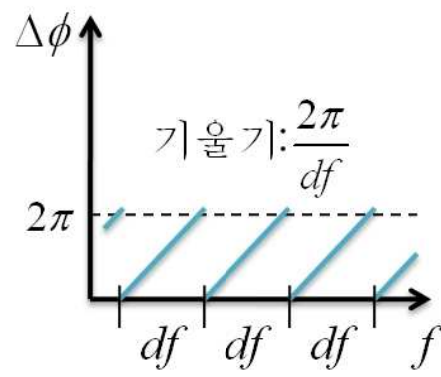
실수부의 수렴값은 양의수렴과 음의수렴에 대해 부호가 같지만, 허수부의 수렴값은 그들의 부호가 다르다. 만약 극한 지점에서 부호가 바뀌게 되면, 식 2.11에서 보면 알 수 있듯이, 위상의 부호가 바뀌게 된다. 이는 그림 2.14를 보며 알 수 있듯이, 위상이 위치한 분면이 바뀌게 되므로, 위상 자체가 크게 바뀔 수 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

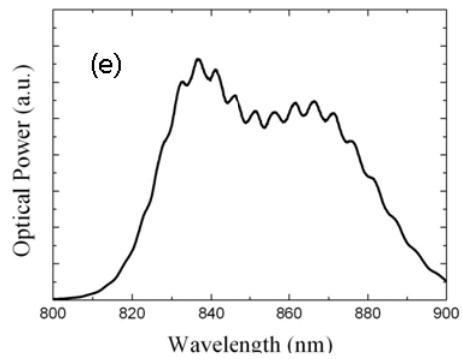
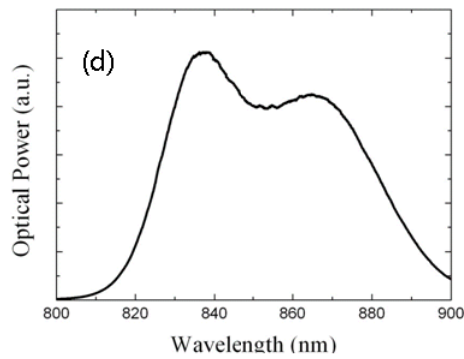


그림 2.13 두 경로로 진행되는 빛에 의한 간섭
 (a) MMF를 진행하는 분산된 빛 모식도,
 (b) 주파수에 따른 위상차의 변화, (c) 위상차의 주기적인 모습,
 (d) 광원의 스펙트럼, (e) 모드분산에 의해 간섭된 스펙트럼

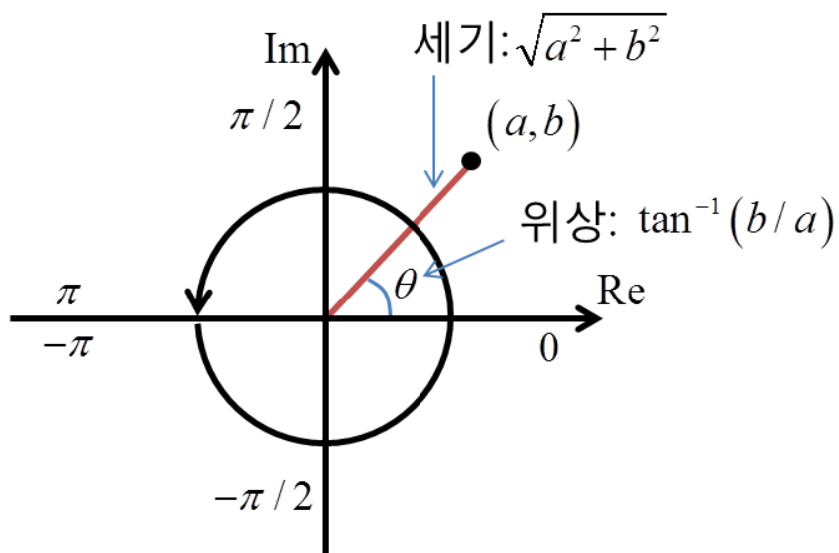


그림 2.14 역탄젠트 함수와 관련된 극좌표계

제3장 실험 및 결과

제1절 간섭계 시스템 개발

MMF의 모드간 분산을 측정하는 측정계를 만들기 위해 먼저 기본적인 원리를 이용한 간섭계 구현이 필요하다. 먼저 결과가 확실히 예상되는 투과형 공간섭계를 개발하였고, 그 다음 실제 현장에서 사용되기 용이한 반사형 공간섭계를 개발하였다. 더 나아가 3-dB Optical Coupler보다 광 손실이 더 적은 Optical Circulator를 이용한 간섭계를 개발하였다. 세 종류의 간섭계로 측정한 측정 결과는 표 3.2에 정리되었다.

1. 투과형 광 간섭계 개발

그림 3.1(a)는 투과형 광 간섭계를 나타낸 모식도이다. 모드분산을 측정하고자 하는 광섬유에 백색광을 입사시켜서 출력 스펙트럼을 관찰하는 기초적인 간섭계를 구성하였다.

실험에 사용된 샘플은 Corning사의 MMF로, 광 패치코드가 없는 샘플이라서 순수한 샘플만의 분산을 측정하기 위해서는 Bare Fiber Connector를 이용해야 했다. 이 광학 소자는 본 샘플과 같이 패치코드가 없는 광섬유를 이용하여 실험하고자 할 때 손쉽게 일반 패치코드와 연결할 수 있도록 임시로 광 패치코드를 만들어주는 역할을 한다. 그림 3.2 참조.

이 때 본 실험의 경우 SMF와 샘플과의 연결부분 사이에 빈 공간이 있으면 여기서 반사가 일어나게 되므로 제대로 된 결과값을 얻지 못할 수도 있다. 그래서 빈 공간이 없도록 만들기 위해 광학 현미경을 이용하여 Bare Fiber Connector 끝단에 정확히 광섬유 절단면이 위치하도록 정렬하였다.

그림 3.3은 투과형 광 간섭계를 통해 진행한 빛의 스펙트럼이다. 모드간 간섭현상 때문에 스펙트럼에 변화가 있음을 알 수 있고, 그림 3.4(a)에 나타나 있듯이 주파수분석을 한 결과를 통해 해당 샘플의 모드간 분산이 얼마나 일어나는지를 알 수 있다. 측정을 통해 얻은 샘플 MMF의 모드간 분산은 약 0.56 ps이며, 대역폭으로 환산하면 1,339 MHz-km로, 실제 성능표에 적혀있는 1,363 MHz-km와 비교했을 때 우리가 구성한 광 간섭계를 통한 대역폭 측정 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

2. 3-dB Optical Coupler 기반 반사형 광 간섭계 개발

MMF의 모드분산 측정계를 이용하여 실제 현장에서 모드분산을 측정할 때, 위에서 소개한 투과형 간섭계를 이용하게 되면, 광섬유 양 끝단(중계기 - 가정집) 모두 어떠한 장치와 연결되어 있어야 한다는 단점이 있다. 이를 개선한 방식이 광 커플러를 이용한 반사형 광 간섭계다.

그림 3.1(b)는 광 커플러를 이용한 반사형 광 간섭계의 모식도이다. 샘플에 광원을 넣어주고, 반대쪽 끝단에서 약 4%의 반사율로 반사하여 다시 돌아오는 빛의 스펙트럼을 OSA로 관측하는 광학계다. Optical Coupler의 특성상 입력단과 출력단이 각각 2개씩 존재하는데, 샘플로 가지 않는 출력단의 광은 소멸하도록 할 필요가 있다. 샘플로 간 빛의 광 세기가 훨씬 더 약해서, 이 출력단과 샘플 광섬유간의 간섭에 의해 노이즈 성분이 발생할 수도 있기 때문이다. 이를 개선하기 위해서 샘플과 연결되어있지 않은 출력단 끝을 광섬유절단기로 매끄럽게 절단한 뒤, Index Matching Oil을 발라서 반사되는 빛이 크게 줄어들도록 설계하였다.

그림 3.4(b)는 광 커플러를 이용한 반사형 측정계로 측정한 모드간 분산이다. 투과형 광간섭계는 샘플에 빛이 한번 통과하지만, 반사형 간섭계는 샘플 끝단에서 반사되어 돌아온 빛의 스펙트럼을 관찰하는 것이므로, 샘플을 두 번 통과하게 된다. 그래서 이 실험 결과의 x축은 모드간 분산에 샘플 길이의 두 배 만큼 나왔다. 그 결과 투과형 간섭계를 이용한 모드분산 측정 결과와 같은 0.56 ps/m를 얻었으며, 대역폭으로 환산하면 1,339 MHz-km 이다.

3. Optical Circulator 기반 반사형 광 간섭계 개발

광원의 광 출력과 OSA의 수광 민감도에도 한계가 있으며, 고출력 광원과 고민감도 분석기를 사용할 경우 그 가격과 무게, 전력소모가 크게 증가하므로 적당한 출력의 광원과 적당한 수광 민감도를 가진 OSA나 Spectrometer를 사용할 필요가 있다. 즉, 광원과 광 분석기의 출력과 감도의 한계가 있는 만큼, 광 간섭계에서 생길 수 있는 광 손실을 최소화 할 필요가 있다. 그래서 위에서 소개한 반사형 광 간섭계 중, 광 커플러를 이용한 간섭계의 손실을 좀 더 줄여보고자 Optical Circulator를 이용하여 광 간섭계

를 새로 구성해보았다.

그림 3.1(c)는 Optical Circulator를 이용하여 광 간섭계를 구성한 모식도이다. 이 간섭계를 구성하여 그 손실과 모드간 분산 측정결과를 비교하였다.

그림 3.4(c)에 나와있듯이, Optical Circulator를 사용하더라도 비슷한 형태의 모드간 분산 그래프를 얻을 수 있었고, 최대 모드간 분산 또한 기존과 동일한 0.56 ps/m로 측정됐다. 이를 대역폭으로 환산하면 1,339 MHz-km 이다. Optical Circulator를 이용한 광 간섭계 또한 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 다음으로 세 종류의 간섭계의 광 손실을 비교하였다. 실험 방법은 광원의 세기를 기준으로 하여 각 측정 시스템에서 얻어지는 광 세기를 비교하여 손실을 측정하였다. 그 결과 투과형 간섭계는 5.93-dB의 손실이 있었고, 3-dB Optical Coupler를 이용할 경우 약 29.15-dB의 손실이 있었으며, Optical Circulator를 이용했을 때 약 24.50-dB의 손실이 있는 것으로 측정됐다. 반사형 광 간섭계를 설계함에 있어서 Optical Circulator를 이용한 경우, Coupler를 사용했을 때 보다 4.65-dB (약 2.9배)의 손실을 줄일 수 있었다.

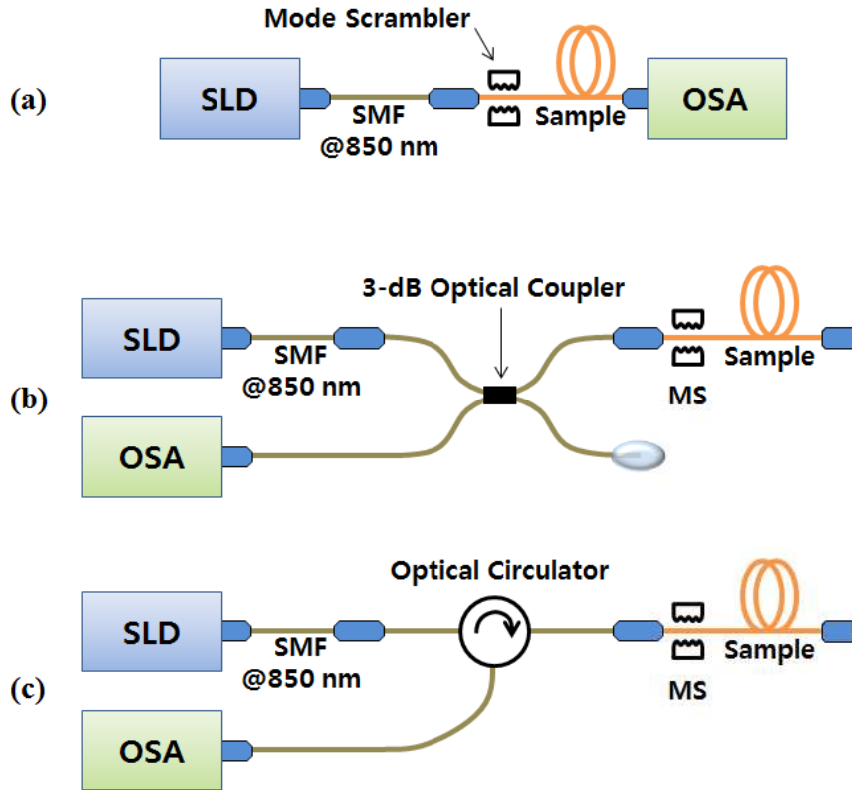


그림 3.1 모드간 분산 측정을 위한 광섬유 간접계 종류별 모식도
 (a) 투과형, (b) 반사형 - 3-dB Optical Coupler,
 (c) 반사형 - Optical Circulator

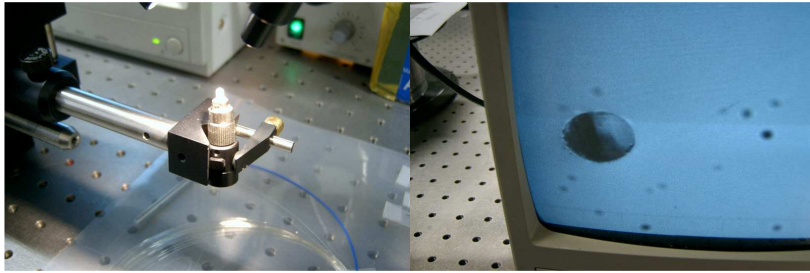


그림 3.2 Bare Fiber Connector를 이용한 임시 패치코드 제작

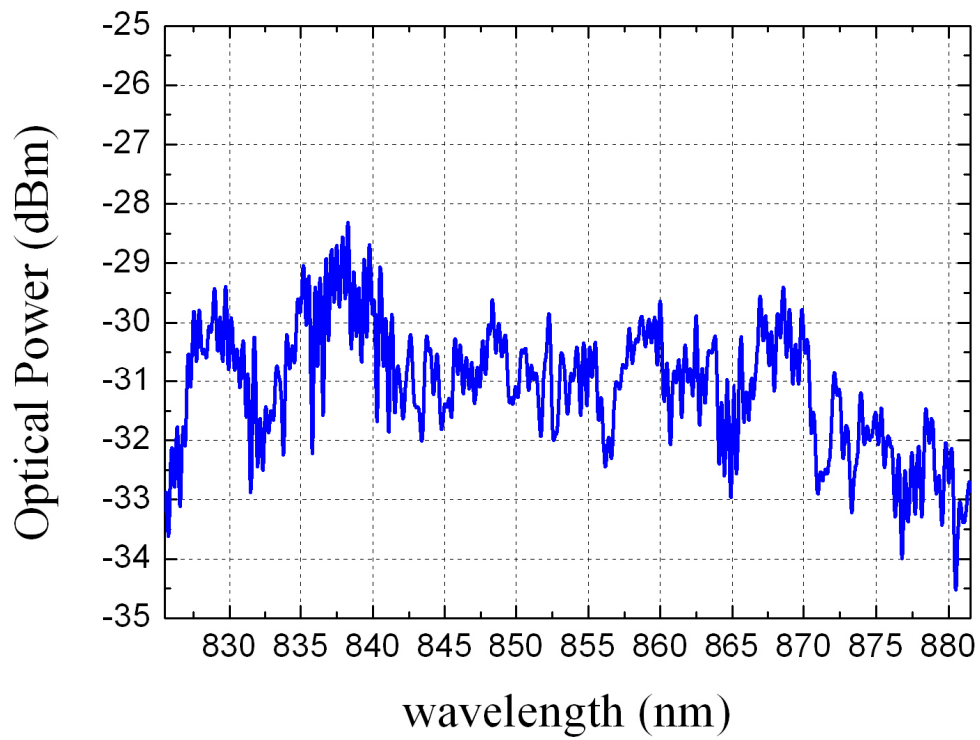


그림 3.3 투과형 광 간섭계의 파장 분포

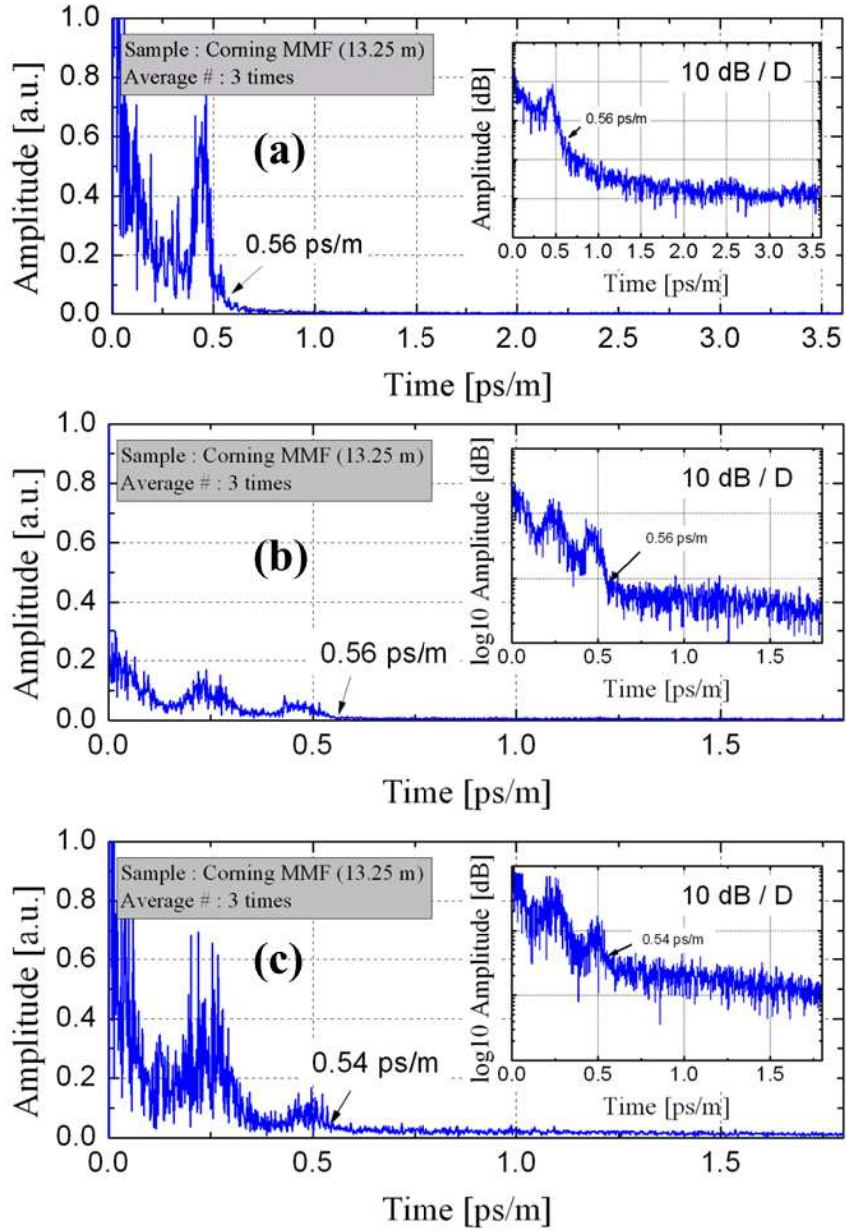


그림 3.4 각 측정계별 모드간 분산 측정 결과

(a) 투과형, (b) Coupler를 이용한 반사형, (c) Circulator를 이용한 반사형

표 3.1 측정 방식에 따른 측정 결과 및 손실률 비교

	모드간 분산 ps/m	대역폭 MHz-km	손실률 dB
투과형 측정계	0.56	1,339	5.93
3-dB Optical Coupler를 이용한 반사형 측정계	0.56	1,339	29.15
Optical Circulator를 이용한 반사형 측정계	0.54	1,388	24.50

제2절 측정 스펙트럼 영역에 따른 노이즈 영향

모드간 분산을 안정적으로 측정하기 위해서는 안정적으로 출력되는 스펙트럼 영역을 이용해야 한다. 스펙트럼의 모양의 변화에 따라 푸리에변환 결과에 큰 영향을 주기 때문이다. 보통의 경우 FWHM을 안정된 영역으로 보고 이 구간을 이용하여 모드간 분산을 측정한다. 그러나 간혹 높은 분해능을 필요로 하는 경우 FWHM을 벗어난 영역의 스펙트럼도 측정할 때도 있다. 이러한 경우 안정되지 않는 영역에서 측정을 하게 되면 모드간 분산 측정 시 노이즈가 많이 생긴다. 넓은 영역의 스펙트럼을 이용하면서도 노이즈를 크게 발생시키지 않기 위해서는, 광원의 안정된 스펙트럼 영역으로 모드간 분산을 측정해야 한다. 본 실험에서는 광원의 안정적인 스펙트럼이 어디인지 확인하고, 그 영역을 이용하여 모드간 분산을 측정하였을 때 안정적이지 못한 영역의 결과와 어떻게 다른지 비교하였다.

1. 안정적인 스펙트럼 영역 확인

실험 구성은 그림 3.5(a)와 같다. 본 실험에 사용된 광원은 EXALOS사의 EXS8510-2411이다. 본 실험에서는 광원의 스펙트럼을 일정 시간 간격으로 측정을 하여 그 변화폭을 그래프로 나타내었다. 광원의 안정도 측정 시 다른 영향을 받지 않도록 하기 위하여 광원과 OSA를 바로 연결시켰다.

그림 3.6은 일정 시간 간격으로 스펙트럼을 측정하여, 각 스펙트럼간 차이를 나타낸 그래프이다. 측정 결과 대체적으로 FWHM 영역은 안정적이었으며, 이를 조금 벗어난 구간에서도 비교적 안정적인 모습을 보였다. 반면, 특정 파장을 벗어난 광의 세기는 매우 불안정했음을 확인했다. 본 광원의 안정적 영역은 약 820 nm에서 900 nm 영역임을 확인했다.

2. 광원의 안정성이 모드간 분산 측정에 미치는 영향

실험 구성은 그림 3.6(b)와 같이 하였다. 안정적인 스펙트럼이 측정 결과에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험인 만큼 측정에 사용된 스펙트럼 영역을 변수로 두었다. 먼저 800 nm에서 900 nm까지의 스펙트럼을 측정하였고, 여기서 비교적 안정된 영역인 820 nm에서 900 nm 영역의 스펙트럼으로 모드간 분산을 계산하고, 안정되지 않은 영역인 800 nm에서 900 nm까지의 영역을 이용해서 모드간 분산을 측정하여 이 두 결과를 비교하였다.

비교 결과는 그림 3.7과 같다. 그림 3.7(a)는 800 nm에서 900 nm의 스펙트럼으로 계산한 모드간 분산이며, 그림 3.7(b)는 비교적 안정적인 820 nm에서 900 nm 영역으로 계산한 모드간 분산이다. 두 결과를 비교하면 알 수 있듯이, 안정된 스펙트럼을 이용하여 모드간 분산을 계산하는 것이 측정 결과를 안정적이게 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 분해능을 높이기 위해 무작정 스펙트럼 범위를 늘이기 보다는, 이와 같이 안정된 영역의 스펙트럼을 먼저 찾은 다음에 이용해야 한다는 점을 확인했다.

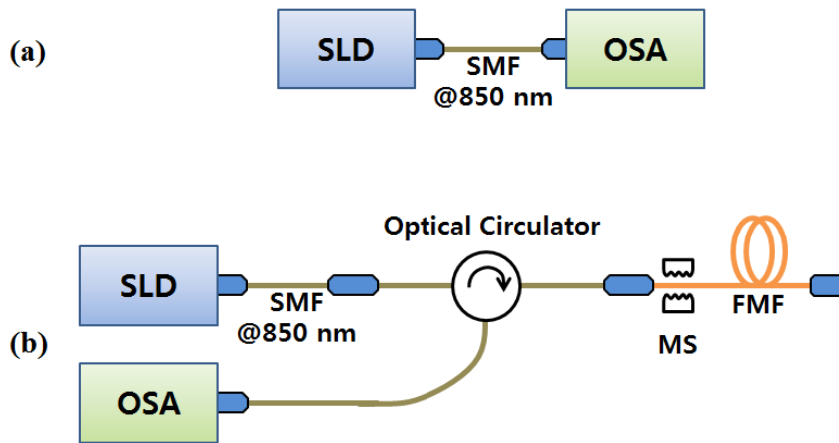


그림 3.5 안정화 영향 실험 모식도 (a) 스펙트럼 분석, (b) 모드간 분산 측정

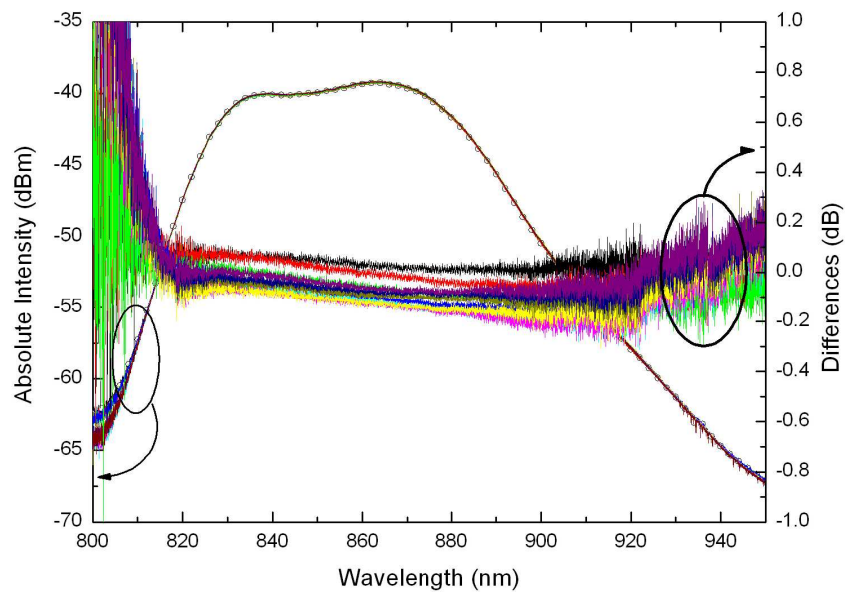


그림 3.6 광원의 스펙트럼 및 초기 측정과의 오차

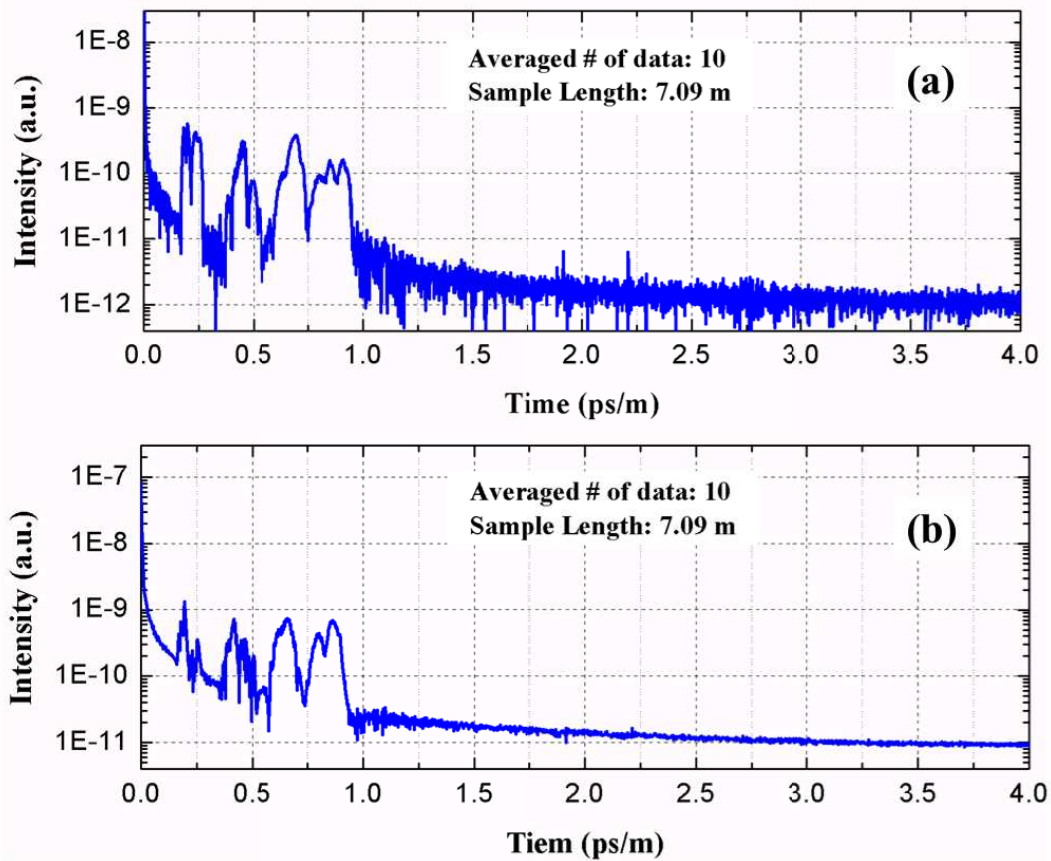


그림 3.7 파장 안정화 영향 비교

(a) 800 nm ~ 900 nm에서 측정, (b) 820 nm ~ 900 nm에서 측정

제3절 OSA와 Mini-Spectrometer의 비교

본 연구를 통해 모드간 분산 측정계를 현장에서 측정할 수 있도록 휴대가 가능한 구조로 개발할 수 있다. 기존 측정계의 구조에서 스펙트럼 분석기로서 OSA가 사용됐는데, 이는 분해능이나 감도 등이 좋은 대신 부피가 크고 무겁다는 단점 때문에 휴대 장비로는 사용할 수 없는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 Mini-Spectrometer로 대체하면 적당한 분해능을 가진 소형화된 측정계를 구성할 수 있다.

그림 3.8에는 OSA(AQ6319, Yokogawa)와 Mini-Spectrometer(HR4000+(user configured), OceanOptics)의 동작 구조와 각 제품 사진이 있다. 두 종류의 스펙트럼 분석기 모두 슬릿을 통해 들어온 빛을 회절격자(Diffraction Grating)를 이용하여 주파수 별로 나뉜다. 이렇게 나뉜 스펙트럼의 분포를 어떤 방식으로 측정하느냐에 따라 OSA와 Mini-Spectrometer의 동작 구조가 나뉜다. OSA는 회절격자를 회전시키면서 고정된 단일 디텍터로 들어오는 파장에 따라 그 빛의 세기를 측정하는 원리로 동작한다. Mini-Spectrometer는 고정된 회절격자에서 회절된 빛을 1차원 배열의 CCD로 측정하되, 각 픽셀의 위치마다 다른 파장이 입사된다. 이 두 종류의 측정기의 성능이나 부피 및 가격 비교는 표 3.2에 정리되었다.

일반적인 Mini-Spectrometer는 제한된 공간 안에서 최대한 좋은 분해능을 갖기 위해 회절격자에서 산란된 빔을 내부에서 여러 번 반사시켜 1차원 배열 CCD에 맺히게 된다. 이 과정에서 신호의 왜곡이 생길 수 있다. 또한, 별도의 직류전원장치가 있는 OSA와는 달리, Mini-Spectrometer는 USB 전원을 사용한다. USB 전원의 불안정성 때문에 1차원 CCD로 측정하는 스펙트럼의 측정에도 노이즈가 생길 수도 있으며, 이는 제3장 제2절에서 다룬 바와 같이 모드간 분산 측정시 노이즈의 원인이 될 수도 있다. 따라서 OSA와 Mini-spectrometer를 이용한 모드간 분산 측정 비교를 통해 Mini-Spectrometer로도 충분히 모드간 분산을 측정할 수 있음을 보여야 한다.

각 실험 구성은 그림 3.9와 같다. 본 실험은 손실로 인한 측정 노이즈를 발생시키지 않도록 하기 위해 손실률이 가장 낮은 투과형 측정계로 실험하였다. 측정에 사용된 광섬유는 SMF-28이며, 측정에 사용되는 850 nm 영역에서의 V-number는 약 4.2 정도이다. 따라서 본 실험에서 이 광섬유는 FMF로써 동작했다고 볼 수 있다. 이 수치는 광섬유의 성능표 상의 코어 반지름이나 Numerical Aperture 등을 참조하여 계산한 값이므로 어느 정도의 오차는 예상된다.

측정 결과는 그림 3.10과 같다. OSA와 Mini-Spectrometer를 이용하여 측정한 최대 모드간 분산이 각각 0.95 ps/m와 0.93 ps/m로 약 2.1%의 오차가 났다. 이 측정 오차 범위안에서 Mini-Spectrometer를 OSA 대신 사용할 수 있음을 보여준다.

본 실험을 통해 모드간 분산 측정계를 구성할 때 스펙트럼 분석기로써 OSA 대신 mini-spectrometer를 사용해도 된다는 것을 확인하였다.

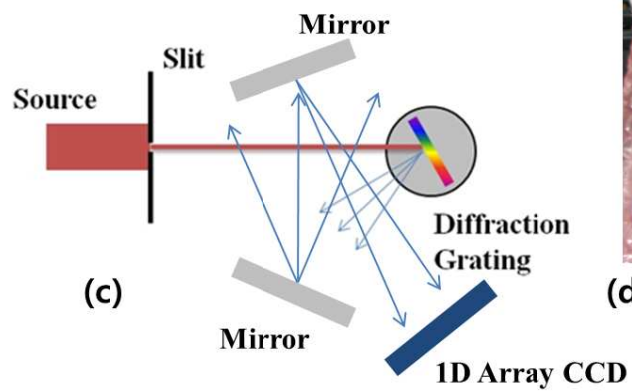
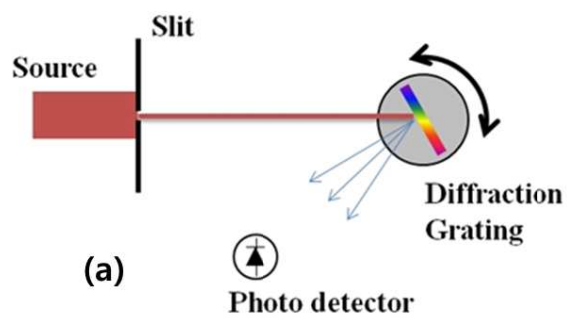


그림 3.8 OSA 및 Mini-Spectrometer의 사진 및 동작 원리
(a,b) OSA, (c,d) Mini-Spectrometer

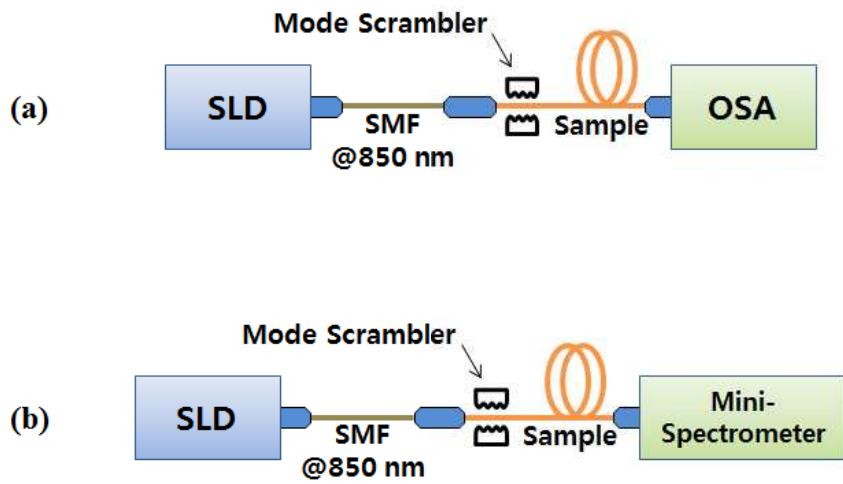


그림 3.9 OSA 및 Mini-Spectrometer 비교 측정 실험 모식도
(a) OSA, (b) Mini-Spectrometer

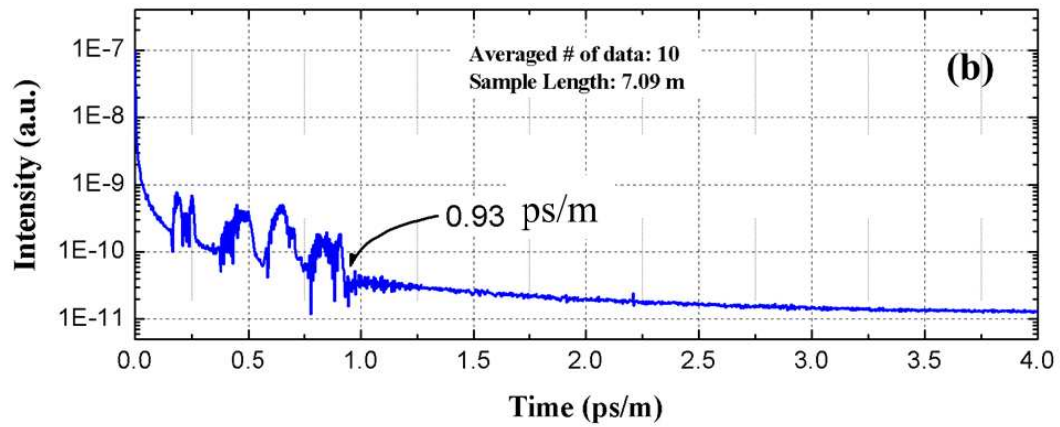
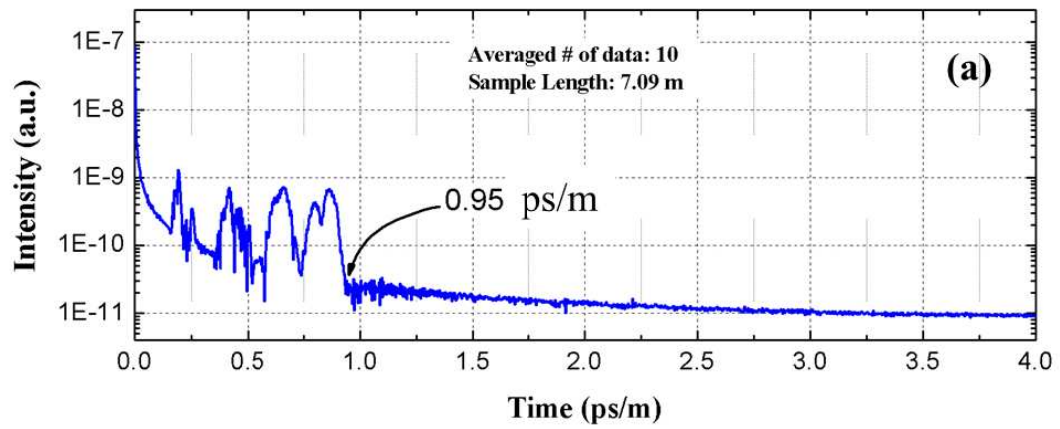


그림 3.10 OSA와 Mini-Spectrometer를 이용한 측정 결과 비교
(a) OSA, (b) Mini-Spectrometer

표 3.2 OSA와 Mini-Spectrometer의 성능 및 규격 비교

	분해능 (nm)	측정가능 파장(nm)	민감도	중량	부피(mm ³)	가격 (원)
OSA	up to 0.01	600 to 1700	-60dBm @ 0.05 nm resol.	33 kg	425*500*222	수천만
Mini- Spectr ometer	~ 0.05	753 to 932	100 photons per count @ 800 nm	570 g	150*120*50	< 천만

제4절 모드간 분산의 위상 해석

모드간 분산의 위상 정보는 분산이 일어난 지점에서 그 값이 크게 변할 수 있다는 것을 제2장 제3절에서 확인한 바 있다. 하지만 여러 가지 근사와 가정들을 했기 때문에 실제로 모드간 분산이 일어난 지점에서 위상 변화가 어떻게 일어나는지를 확인할 필요가 있다.

본 실험에서는 기존 Circulator를 이용한 반사형 계측기와 마이켈슨 간섭계를 혼합하였다. 그림 3.11의 Collimator 부분이 원래 광섬유 샘플이 달려있던 부분이다. 이곳에서 나온 빛이 Beam Splitter(BS)를 지나 광 경로가 나뉘어서 Mirror 1(M1)과 Mirror 2(M2)까지의 길이 차를 가지고 반사되어 BS, Collimator, Circulator를 거쳐 Mini-Spectrometer에 들어가게 된다. 여기서 마이켈슨 간섭계의 M1과 M2에서 반사된 광의 광 경로차가 곧 모드간 분산이라는 가정을 할 수 있다. 따라서 본 간섭계를 통해 얻은 스펙트럼의 푸리에 변환 값은 비교적 이상적으로 잘 제어가 된 모드간 분산을 측정했다고 볼 수 있다. 본 실험에서는 이론에서의 여러 가정들 중에서 두 가지의 이상적인 가정들이 어느 정도 반영됐다. 첫 번째로는 색분산이 없다는 가정으로 공기중으로 진행하기 때문에 파장에 따른 경로차, 즉, 색분산이 없다는 가정이 반영됐다. 두 번째로는 딱 두 개의 광선만을 이용하여 간섭을 일으켰다는 점이다. 스펙트럼이 파장에 대해 상수라는 가정은 반영되지 않았다.

실험 결과는 그림 3.12에 나타내었다. 두 경로로 진행한 빛에 의해 간섭된 스펙트럼은 그림 3.12(a)이며, 스펙트럼 푸리에 변환값의 세기는 그림 3.12(b)에 나타냈으며, 위상은 그림 3.12(c)에 나타냈다. 모드간 분산의 세기에서 가장 썩 부분은 1 ps 바로 이전 지점으로 나왔고, 이에 해당하는 위상은 원래의 위상보다 π 만큼 변한 지점으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로, 모드간 간섭이 일어난 지점은 원래 위상에서 π 만큼 변한 지점이라는 것을 짐작 할 수 있으며, 역으로 π 만큼의 위상 변화가 일어난 지점이 모드간 간섭이 일어난 지점이라는 것도 알 수 있게 됐다. MMF에서도 이와 같이 마지막에서 π 만큼 위상변화가 일어난 지점을 모드간 간섭이 일어난 마지막 지점이다. 이 마지막 위상변화(최종 간섭)의 위치가 최대 모드간 분산이 발생하는 위치를 나타낸다. 마지막 위상변화 지점을 찾으면 광섬유의 최대 모드 분산을 측정하게 되는 원리이다.

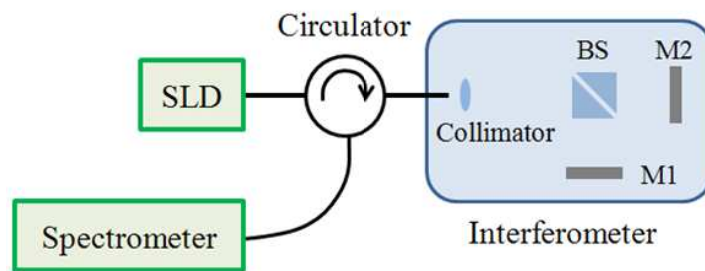


그림 3.11 반사형 계측기와 마이켈슨 간섭계를 혼합한 간섭계 모식도

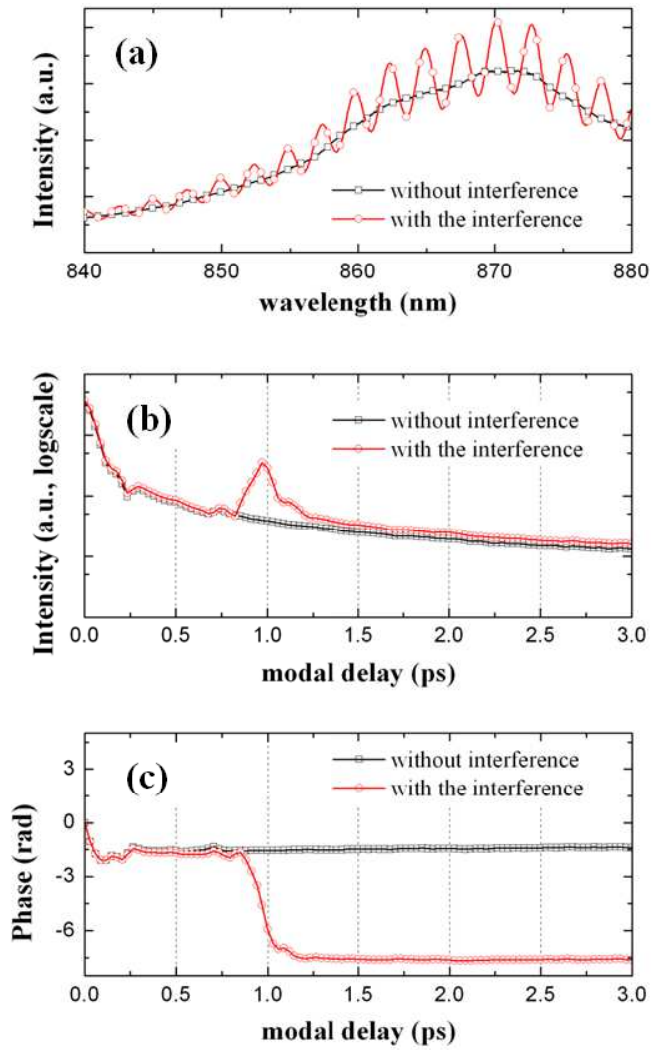


그림 3.12 간섭 유무에 따른 측정값 비교
(a) 스펙트럼, (b) 모드간 분산(세기), (c) 모드간 분산(위상)

제5절 분해능

OFDR을 이용한 모드간 분산 측정 시스템은 측정 스펙트럼 폭에 의해 분해능이 결정되며, 광원의 형태에 따라 수치적 분해능과 관계없이 더 낮은 분해능을 보이게 되기도 한다. 최근 새롭게 발전하고 있는 MDM은 구현 방식에 따라 모드간 분산을 매우 크게 하기도^[10,11], 매우 작게 하기도 해야 한다^[9,12]. 모드간 분산의 크고 작음에 따라 모드간 Crosstalk와 모드간 지연이 서로 상보적 관계로 나타나기 때문에, MDM 구현 방법에 따라 필요로 하는 모드간 분산 특성이 있다^[9]. 그 중 모드간 분산이 매우 작아야 하는 경우는 Multiple Input Multiple Output(MIMO) 계산을 수행하는 분야인데, 이는 모드간 분산이 0.1 ps 이하가 되도록 한 쪽 모드에 delay line을 만들어 주기도 한다^[9].

본 실험에서는 본 측정계가 어느정도의 분해능을 갖고 있는지를 확인하기 위해 수행하였다. 측정에 사용된 스펙트럼 폭을 이용하여 수치적인 분해능을 얻었고, 마이켈슨 간섭계를 이용하여 경로차를 거의 갖게 했을 때 몇 ps의 경로차 까지 분해해 낼 수 있는지를 측정하였다.

본 실험은 Circulator를 이용한 반사형 간섭계로 실험이 진행됐으며, 기존 샘플이 위치했던 자리에 마이켈슨 간섭계를 위치시켰다. 실험에 사용된 광원은 EXALOS 사의 EXS8510-2411 이며, 구동 전류에 따라 56.1 nm의 FWHM을 가지기도 한다.

1. 수치적 분해능

이 스펙트럼 범위를 광원의 FWHM 영역으로 설정해 놓지만, 측정 결과의 안정화를 위해서 이 범위를 조금 다른 곳에 두기도 한다는 것을 확인한 바 있다. 특정 파장 범위에 해당하는 분해능은 $\Delta t = (\lambda_0^2)/(c\Delta\lambda)$ 으로 구할 수 있으며^[23], 본 실험에서는 800 nm에서 880 nm 영역의 스펙트럼을 측정했으므로 수치적 분해능은 약 0.03 ps로 계산됐다. 하지만 모드간 분산이 0.03 ps라고 하더라도 본 시스템으로 측정하지 못할 수도 있다. 광원 자체가 가지는 스펙트럼 형태 때문에 모드간 분산이 0에 가까운 부분은 이것에 어느 정도 영향을 받기 때문이다.

2. 실질적 분해능

실제로 모드간 분산이 얼마나 작은 수치까지 측정이 가능한지 알아보기 위해 마이켈슨 간섭계의 경로차를 0에 가깝게 하여, 변위를 조금씩 줘 가면서 측정 가능한 최소 변위를 알아보았다.

실험 결과, 간섭계의 경로차에 따른 경로간 시간차 측정 결과는 그림 3.13과 같이 나타났다. 경로간 시간차가 약 0.2 ps인 지점까지 인식함을 알 수 있었음을 확인했다. 이는 일부 MDM 개발시 요구되는 0.1 ps 이하의 모드간 분산을 측정할 수 없는 수치이다. 하지만, 경로간 시간차를 미세하게 변화를 주면, 측정 결과도 비교적 선형적으로 변함을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 모드간 분산이 0이 되는 지점을 유추할 수도 있을 것이다.

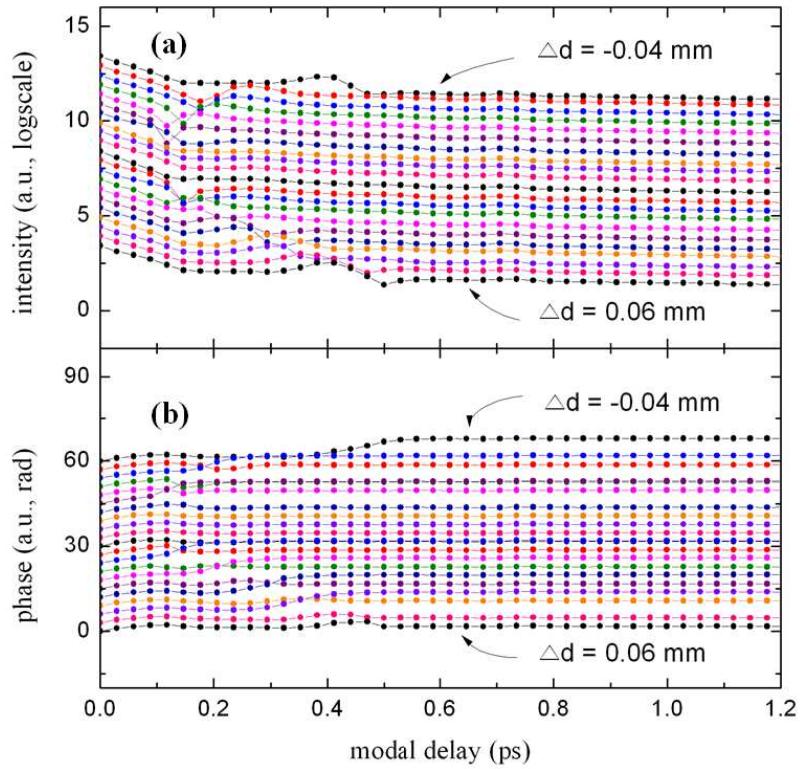


그림 3.13 마이켈슨 간섭계의 미세 경로차 영역에서의 모드간 분산
(a) 세기, (b) 위상

제6절 샘플 길이별 모드간 분산 측정

실제 측정에 사용될 MMF의 길이는 제각각일 것이다. 이를 측정계는 샘플의 길이에 상관 없이 비슷한 결과값을 출력할 수 있어야 한다. 본 실험에서는 샘플의 길이를 변경했을 때에도 동일한 모드간 분산 값을 얻을 수 있는지 확인하였다.

실험 구성은 Circulator를 이용한 반사형 타입에 FMF 또는 MMF 샘플을 연결하여 모드간 분산을 측정하였고, Mode Scrambler를 이용하여 최대한 많은 모드를 여기시켰다. 실험에 사용된 FMF는 Thorlabs 사의 980HP 이며, 우리가 사용하는 850 nm 대역에서는 FMF로써 동작한다. MMF로는 삼성에서 제작한 광섬유이며 성능표는 없어서, 본 실험에서는 광섬유의 길이변화에 따른 측정 결과값의 일관성이 유지되는지에 초점을 맞추어 계획이다.

그림 3.14와 3.15는 각각 FMF와 MMF의 길이변화에 따른 모드간 분산의 세기 및 위상 정보를 나타낸 그래프다. 두 샘플 모두 이산 푸리에변환에 의한 한계를 벗어나는 길이의 샘플에 대해서는 모드간 분산이 마치 더 적어지거나 없는 것처럼 나타났다. 표 3.3, 3.4는 각각 FMF와 MMF의 길이에 따른 최대분산지점을 위상정보를 이용하여 정리한 표다. 표에 나타난 평균과 표준편차는, 회색 음영처리된 데이터만을 이용하여 계산한 값이다. 결과를 분석해보자면, 이산 푸리에변환의 한계에 의한 측정 범위를 벗어난 경우를 제외하고는 대체적으로 비슷한 수치의 모드간 분산값을 나타낸 것으로 나타났다. FMF와 MMF 샘플의 측정 표준편차는 각각 3%, 6% 정도였으며, 이는 대체적으로 균일한 결과값을 보여주고 있다고 판단했다. 본 실험을 통해 이산 푸리에변환 한계 내에서의 모드간 분산 측정이 샘플 길이에 상관 없이 가능하다는 것을 확인하였다.

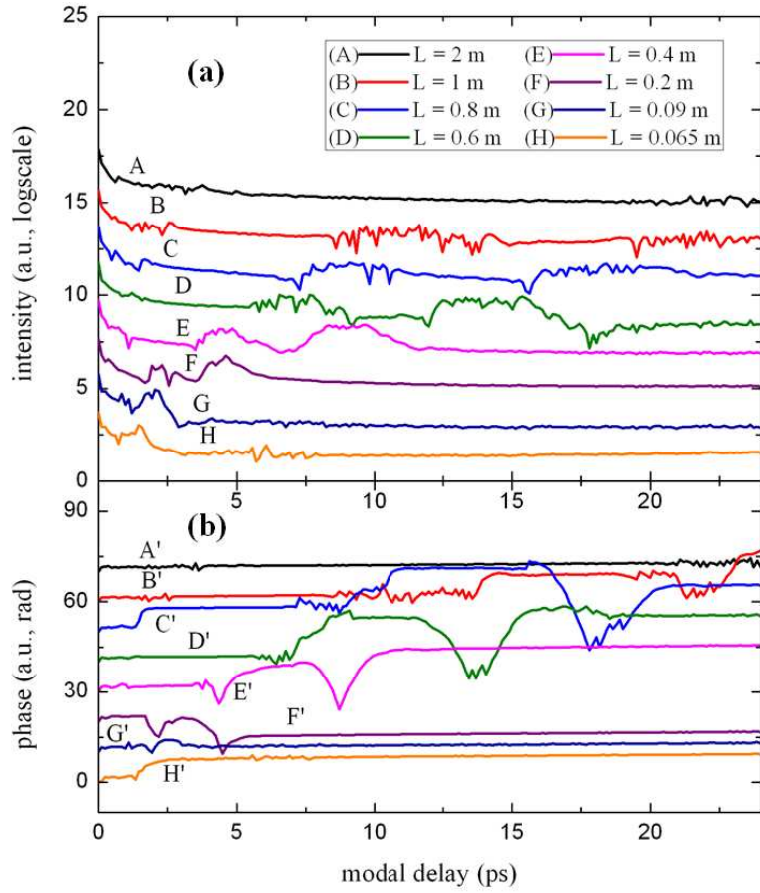


그림 3.14 FMF의 샘플 길이별 모드간 분산.

(a) 세기, (b) 위상

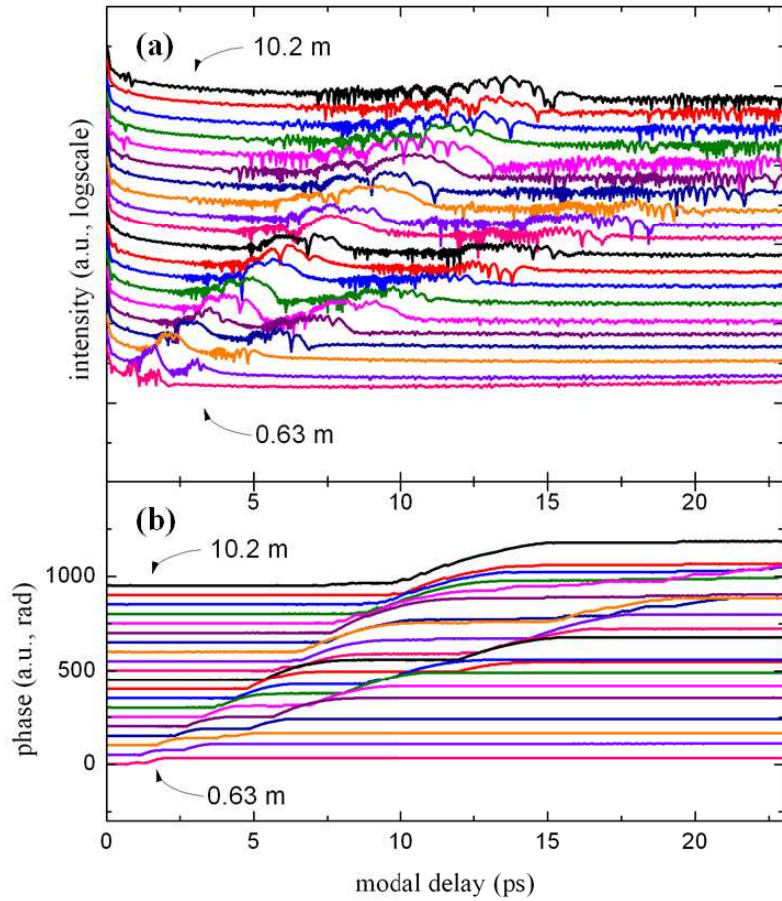


그림 3.15 MMF의 샘플 길이별 모드간 분산.

(a) 세기, (b) 위상

표 3.3 FMF 샘플 길이별 모드간 분산

샘플 길이 (m)	모드간 분산 (ps/m)
0.065	24.2
0.09	21.5
0.2	24.2
0.4	25.1
0.6	25.0
0.8	24.8
1.0	-
2.0	-
평균	24.0
표준편차	1.3

표 3.4 MMF 샘플 길이별 모드간 분산

샘플 길이 (m)	모드간 분산 (ps/m)
0.63	1.45
1.13	1.45
1.63	1.46
2.13	1.4
2.63	1.52
3.13	1.5
3.63	1.44
4.13	1.51
4.63	1.49
5.13	1.49
5.63	1.43
6.13	1.43
6.63	1.45
7.13	1.48
7.63	1.34
8.13	1.4
8.63	-
9.13	-
9.63	-
10.2	-
평균	1.4525
표준편차	0.046975

제7절 MMF의 대역폭 측정

다중모드광섬유의 성능 비교시에 모드간 분산값 보다는 대역폭이 더 일반적으로 사용되는 성능값이다. 이 성능은 해당 광섬유 1 km 통신할 수 있는 최대 주파수를 의미한다. 우리가 측정하는 모드간 분산은 그 단위가 ps/m로, 대역폭과는 다르지만 무관하지는 않다. 앞서 제2장 제2절 3번에서 다룬 바와 같이 모드간 분산을 이용하여 대역폭을 유추하여 계산해 낼 수 있다. 본 실험에서는 이를 실험적으로 확인하기 위해 제조사에서 주어진 성능표와 본 연구의 측정계로 측정한 대역폭을 비교하였다.

이번 실험에 사용된 광섬유는 Corning사의 CPC6라는 MMF이며, 850 nm에서의 대역폭이 1,363 MHz-km로 RF spectrum analysis 방법으로 측정되었다. 실험에 사용된 실험 구성은 Circulator를 이용한 반사형 간섭계이며, 모든 모드를 여기시키기 위하여 Newport사의 Mode scrambler(FM-1)를 사용하였다. 모드간 분산 분석 방법으로는 앞선 실험을 통해 검증한 위상성분을 이용하여 측정하였고, 대역폭은 식 2.7과 2.8을 이용하여 구하였다.

실험 결과, 모드간 분산 분포는 그림 3.16과 같이 나왔으며, 실험에 쓰인 MMF의 모드간 분산은 약 0.565 ps/m로 나타났다. 이를 대역폭으로 변환하면 1,327 MHz-km 이다. 성능표에 표기된 1,363 MHz-km와 약 2.6 %의 오차가 있는 것으로써 광간섭계를 통한 위상변위를 측정하여 최대 모드 분산을 얻어 다중모드광섬유의 대역폭을 결정하는 것이 유용한 것임을 확인하였다.

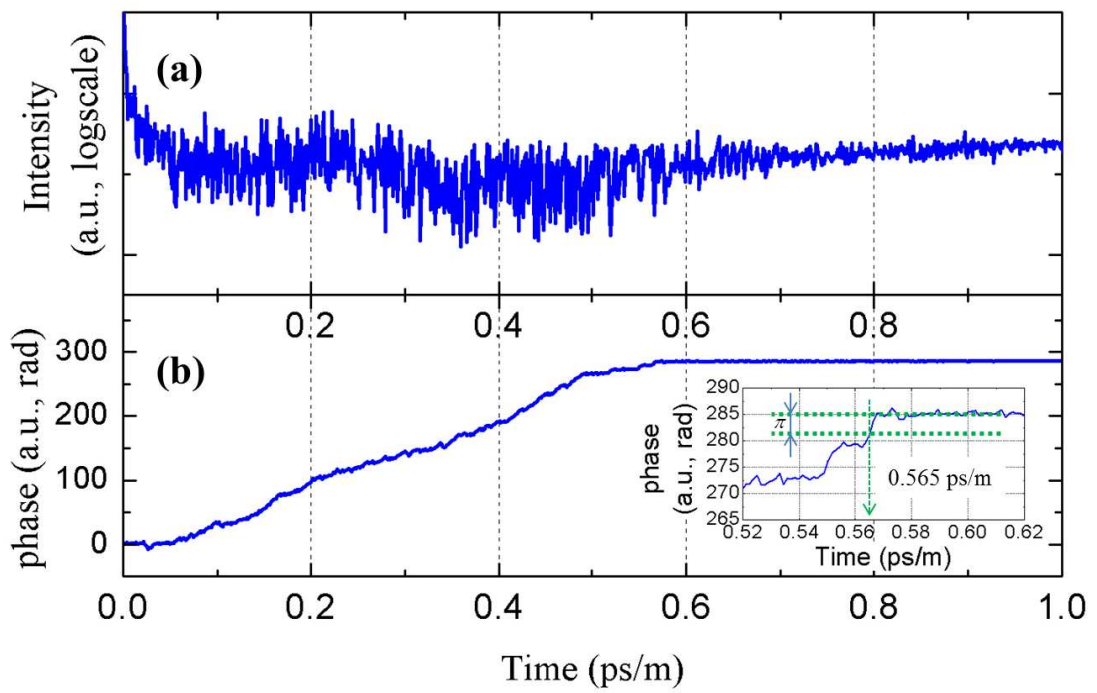


그림 3.16 샘플 MMF의 모드간 분산 (a) 세기, (b) 위상

제4장 결론

본 논문에서는 광섬유 간섭계를 이용하여 다중모드 광섬유(MMF)의 대역폭을 측정하였다. 넓은 파장대역을 가지는 광을 MMF에 투과시켜서 얻은 스펙트럼을 푸리에변환하여 모드간 분산을 측정할 수 있고, 푸리에변환값의 위상 성분을 이용해서 세기 성분에 비해 좀 더 명확한 결과를 얻을 수 있었다. 이렇게 얻은 모드간 분산과 광섬유 대역폭의 관계를 이용하여 MMF의 대역폭을 계산한 결과 2.6% 오차 범위의 정확도를 얻었다.

또한 투과형 간섭계 대신 반사형 간섭계를 이용하여도 모드간 분산을 측정할 수 있음을 확인하였다. MMF에 입사된 빛이 다른 쪽 끝단에서 프레넬 반사에 의해 되돌아온 빛의 스펙트럼을 이용하여도 결과에 큰 차이가 없었다. 이 때 측정 손실을 최소화 하기 위해 3-dB Optical Coupler 대신 Optical Circulator를 사용하여도 무방함을 확인하였고, 이렇게 대체함으로써 4.65-dB(약 2.9배)의 손실을 줄일 수 있었다. 측정 시 노이즈를 줄이기 위해 광원 스펙트럼 중에 안정된 부분만을 이용하여 모드간 분산을 측정하였다. 스펙트럼 중에서 노이즈가 심한 부분을 이용하여 모드간 분산을 측정할 때 보다 안정된 영역을 이용하여 측정할 때 노이즈를 많이 줄일 수 있음을 확인하였다. 측정장비의 소형화를 위해 OSA 대신 Mini-Spectrometer를 사용할 수 있는지 확인하는 실험을 수행하였고, 그 둘의 결과에 큰 차이가 없음을 확인하였다.

모드간 분산의 위상분석에 대해 이론적 해석을 통해 모드간 분산이 일어난 지점에서 큰 위상 변화가 일어날 수 있음을 예측하였고, 실험을 통해 π 만큼의 위상변화가 일어남을 확인하였다. 더불어, 모드간 분산의 위상 정보는 세기 정보에 비해 노이즈가 적게 나타남을 알 수 있었다. 샘플 길이를 변화시켜가며 모드간 분산을 측정한 결과 표준편차가 평균의 약 3%와 6%임을 확인하였다. 하지만 이산푸리에변환의 특성상 Mini-Spectrometer의 분해능의 한계에 의해 측정 가능한 분산의 최대값에 한계가 있다. 한계를 벗어난 길이의 광섬유에 대해서는 마치 모드간 분산이 일어나지 않은 것처럼 보였다. 본 측정계의 분해능에 대해서는, 스펙트럼 폭에 의해 얻어지는 데이터의 간격은 0.03 ps이며, 실질적인 분해능을 알아보기 위해 마이켈슨 간섭계를 이용해 광 경로차를 거의 없도록 만들어서 측정한 결과 약 0.2 ps인 것을 확인하였다.

본 논문에서는 분해능이 0.001 nm인 OSA와, 0.05 nm인 Mini-Spectrometer를 이용하여 모드간 분산을 측정하였다. 그 중 Mini-Spectrometer를 이용하여 현장에 설치된 MMF의 대역폭을 측정하게 되는데, 현재 분해능으로는 측정가능길이의 한계가 있다. 향후 이를 극복할 수 있는 연구가 수행될 필요가 있을 것으로 보인다.

[참고문헌]

- [1] 이상엽, 박상현, 최효섭, 이철동, “MOST 네트워크 기반 차량용 미디어 서비스 구현”, 한국정보기술학회지 Vol. 9, No. 1, pp. 27-34, Apr. 2011.
- [2] 남효진, 구연 트롱 폭, 조용범, “MOST 네트워크를 이용한 멀티미디어 스트리밍 시스템 구현”, 대한전자공학회 하계학술대회, Vol. 33, No. 1, pp. 1215-1218, 2010.
- [3] D. Gloge, “Bending Loss in Multimode Fibers with Graded and Ungraded Core Index”, Applied Optics, Vol. 11, Issue 11, pp. 2506-2513, 1972.
- [4] L. Faustini, and G. Martini, “Bend Loss in Single-Mode Fibers”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, No. 4, pp. 671-679, Apr. 1997.
- [5] “<http://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=SMF-28-1000>”
- [6] “<http://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=GIF625-1000>”
- [7] Corning, “Multimode Chromatic Dispersion Measurement Method”, <http://www.corning.com/WorkArea/downloadasset.aspx?id=7925>, Sep. 2001.
- [8] “<http://www.fiberoptics4sale.com/Merchant2/multimode-fiber.php>”
- [9] M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, H. Mardoyan, P. Brindel, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Bigot-Astruc, L. Provost, and G. Charlet, “Mode-Division Multiplexing of 2×100 Gb/s Channels Using an LCOS-Based Spatial Modulator”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 4, pp. 618-623, Feb. 2012.
- [10] “http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_resolution”
- [11] A. Li, A. Al Amin, X. Chen, and W. Shieh, “Reception of mode and polarization multiplexed 107-Gb/s CO-OFDM signal over a two mode fiber”, in Proc. OFC/NFOEC, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, CA., USA., pp. 1-3, Mar. 2011.
- [12] M. Salsi, C. Koebele, D. Sperti, P. Tran, P. Brindel, H. Mardoyan, S. Bigo, A. Boutin, F. Verluise, P. Sillard, M. Astruc, L. Provost, F. Cerou, and G. Charlet, “Transmission at 2×100 Gb/s, over two modes of 40 km-long prototype few-mode fiber, using LCOS based mode multiplexer and demultiplexer”, in Proc. OFC/NFOEC, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, CA., USA., pp. 1-3, Mar. 2011.

- [13] R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck, C. Bolle, R. Essiambre, P. J. Winzer, D. W. Peckham, A. McCurdy, and R. Lingle, "Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing", in Proc. OFC/NFOEC, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, CA., USA., pp. 1-3, Mar. 2011.
- [14] N. Hanzawa, K. Saitoh, T. Sakamoto, T. Matsui, S. Tomita, and M. Koshiba, "Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler", in Proc. OFC/NFOEC, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, CA., USA., pp. 1-3, Mar. 2011.
- [15] N. Hanzawa, K. Saitoh, T. Sakamoto, T. Matsui, "Asymmetric parallel waveguide with mode conversion for mode and wavelength division multiplexing transmission", in Proc. OFC/NFOEC, Los Angeles Convention Center, Los Angeles, CA., USA., pp. 1-3, Mar. 2012.
- [16] T.-J. Ahn, "New optical frequency domain differential mode delay measurement method for a multimode optical fiber" Optics Express, Vol. 13 Issue 11, May 2005.
- [17] T.-J. Ahn, "Reflection-type monitoring method for differential mode delay at the 850-nm band", in proc. OECC2010, Sapporo, Japan, 7P-24, pp. 304-305, Jul. 2010.
- [18] D. Derickson, "Fiber optic test and measurement" Prentice Hall PTR.
- [19] A. G. Hallam, D. A. Robinson, and I. Bennion, "Mode control for emerging link performance standards", Optoelectronics/IET, vol. 2, Issue 5, pp. 175-181, Oct. 2008.
- [20] TIA standard FOTP-220, "Differential mode delay measurement of multimode fiber in the time domain", TIA-455-220-A.
- [21] L. Raddatz, I. H. White, D. G. Cunningham, and M. C. Nowell, "An Experimental and Theoretical Study of the Offset Launch Technique for the Enhancement of the Bandwidth of Multimode Fiber Links", Journal of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 324-331, Mar. 1998.
- [22] "<http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/basic-optics-for-optical-fiber/>"
- [23] S. O. Kasap, "Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices (International Edition)", Chap. 2, Prentice Hall PTR, 2003.
- [24] "http://en.wikipedia.org/wiki/Spectral_resolution"

[감사의글]

지금까지 학생의 신분으로만 살아오다 쉽표를 찍고, 또다시 목표를 향해 출발하려 합니다. 지금 이 글을 통해 이제까지 저에게 도움을 주시고 지켜봐주신 분들에게 감사의 마음을 글로 남기려 합니다.

먼저 지도교수님이신 안태정 교수님께 감사를 드립니다. 학부 때부터 저를 지켜봐 주시고, 항상 최선을 다하라는 교훈을 여러 방법을 통해 알려주신 것에 감사드립니다. 지방 대학에 다닌다는 점, 저보다 더 능력 있는 학생이 수없이 많다는 현실에도, 저의 가능성과 장점을 일깨워 주셔서 저에게 큰 용기와 희망이 되었고, 공학 선배로서의 경험과 지식을 가르쳐 주심으로써 희망을 넘어 결과로도 나타나고 있는 것에 감사를 드립니다. 공부는 열심히 하고 있는지 물어봐주시던 김현수 교수님, 풀어졌던 저를 다시 다잡을 수 있을 수 있었습니다. 사소한 이야기도 벽 없이 이야기 해주시던 김진태 교수님, 전공뿐만 아니라 인생의 선생님이 되어주셨습니다. 저의 고칠 점을 정확히 지적해주셔서 나아질 수 있도록 도움주신 박종락 교수님, 지금의 전 아직 부족하지만, 현실에 안주하지 않고 많은 발전을 할 수 있었습니다. 기본적인거나 사소한걸 여쭙봐도 궁금했던점을 알기쉽게 알려주신 권민기 교수님, 제가 전혀 몰랐던 전공 분야에 대해 새로 눈을 뜨게 해 주셨습니다. 저와 광기술공학과 학생들에게 큰 가능성을 기대하시는 주기남 교수님, 프로젝트 수업 때 안 될 거라 생각했던 것들을 실현해 나가게 해주셨습니다. 저의 인생에 큰 도움을 주신 교수님들께 다시 한번 감사의 말을 드립니다.

실험실 만형으로서 도움도 많이 주시고 때론 길을 바로잡아 주시던 동석이형께 감사드립니다. 처음 제가 실험실에 들어왔을 때 어색해하던 저에게 말도 많이 걸어주시고 밥먹으러 갈때도 항상 챙겨주시고, 이것저것 물어봐도 귀찮아하지 않고 알려주신 회석이형께 감사드립니다. 여러 실험실이 하나가 되도록 노력하신 동준이형, 실험실 만형으로 고생하시는 일신이형, 뽀 때마다 웃으며 인사해주시던 훈국이형, 모르는거 물어볼 때 친절하게 답해주시던 하폐즈, 사소한 도움 드린것도 고맙다며 선물도 주신 아드난, 고생스런 대학원 회장 역할을 잘 감당해오신 명진이형, 친형처럼 잘 대해주신 철용이형, 그리고 뭉칠 때 힘이 되는 동기들에게 감사드립니다.

마지막으로 저를 나아주시고 키워주시고 가르쳐주시고 걱정해주시고 힘이되어주신 부모님께 감사의 말을 드립니다. 부모님께서 저를 사랑하지 않으셨다면 지금의 저는 없었을 것입니다. 그리고 이 모든걸 계획하시고 행하신 하나님께 감사드립니다.

이곳에 직접 감사의 말씀을 드리지 못한 분들에게도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

김찬영 드림

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(04-015)과 기초연구사업(2012-0004531)의 지원을 받아 수행된 결과임.