

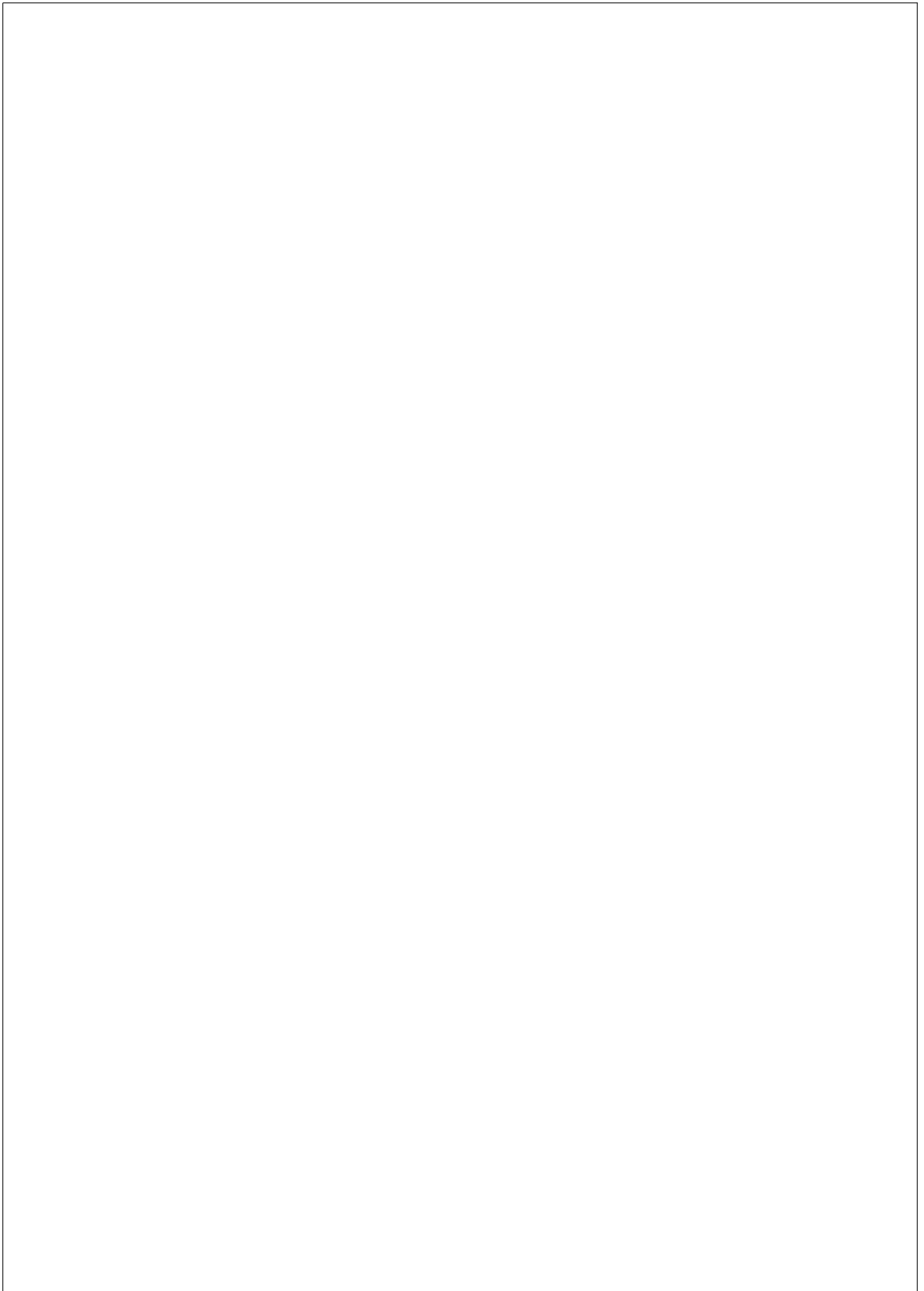
2011年 2月
석사학위논문

광도파로형 광미분기 설계

조선대학교 대학원

광기술훈학과

정희석



광도파로형 광미분기 설계

Design of optical differentiators
based on optical waveguides

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

광기술훈학과

정희석

광도파로형 광미분기 설계

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조 선 대 학 교 대 학 원

광 기 술 공 학 과

정 회 석

정회석의 석사학위논문을 인준함

심사위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 김 진 태 인

심 사 위 원 조선대학교 교수 안 태 정 인

2011년 11월

조 선 대 학 원 대 학 원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이 론	3
제1절 광미분 원리	3
제3장 기존 광미분 종류	8
제1절 장주기 광섬유 격자를 이용한 광미분기	8
제2절 실리콘 마이크로링 공진기를 이용한 광미분기	20
제3절 공간섭계를 이용한 광미분기	24
제4장 응용분야	30
제1절 평탄형 펄스 생성기	30
제2절 초고속 광통신 응용	34
제3절 광펄스 특성 측정	37

제5장 실험 및 시뮬레이션	40
제1절 비대칭형 광커플러의 광미분 원리	40
제2절 비대칭형 광커플러를 이용한 광미분기	45
제3절 대칭형 광커플러의 광미분 원리	64
제4절 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기	69
1. 단일과장 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기	69
2. 다중과장 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기	77
제6장 결론	87
[참고문헌]	88
[감사의 글]	91

표 목 차

표 5.1 비대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건	48
표 5.2 비대칭형 광커플러의 광미분 오차	54
표 5.3 비대칭형 광커플러 제작 조건	60
표 5.4 단일과장 대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건	70
표 5.5 단일과장 대칭형 광커플러의 광미분 오차	76
표 5.6 다중과장 대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건	79
표 5.7 다중과장 대칭형 광커플러의 광미분 오차	88

그림 목 차

그림 2.1 광미분의 개념도	5
그림 2.2 광미분기의 전달함수	6
그림 2.3 광미분의 원리	7
그림 3.1 장주기 광섬유 격자의 모드 개략도	10
그림 3.2 장주기 광섬유 격자의 구조 개략도	11
그림 3.3 장주기광섬유 격자 투과 스펙트럼의 전기장 진폭과 위상	12
그림 3.4 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차, 2차 전달함수	13
그림 3.5 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차, 2차 광미분	14
그림 3.6 장주기 광섬유 격자를 이용한 광미분기 시스템	15
그림 3.7 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차 광미분	16
그림 3.8 분산특성이 포함된 1차 광미분	17
그림 3.9 장주기 광섬유 격자를 이용한 2차 광미분 개요도	18
그림 3.10 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차, 2차 광미분	19
그림 3.11 마이크로링 공진기 구조	21
그림 3.12 마이크로링 공진기 전달함수	22
그림 3.13 제작된 마이크로링 공진기 전달함수	23
그림 3.14 마이크로링 공진기를 이용한 1차 광미분	23
그림 3.15 마이켈슨 광간섭계의 1차 광미분 개략도	25
그림 3.16 마이켈슨 광간섭계의 전기장 진폭과 위상	26
그림 3.17 마이켈슨 광간섭계의 1차 광미분과 위상	27
그림 3.18 마이켈슨 광간섭계의 2차 광미분 개략도	28
그림 3.19 마이켈슨 광간섭계의 2차 광미분과 위상	29
그림 4.1 평탄형 광펄스의 생성원리	31
그림 4.2 평탄형 펄스를 만들기 위한 펄스 스펙트럼과 광미분기 전달함수	32

그림 4.3 장주기 광섬유 격자를 이용한 평탄형 광펄스	33
그림 4.4 640 Gb/s OTDM 광통신 시스템	35
그림 4.5 640 Gb/s 비트 오차율 커브	36
그림 4.6 펨토초 광펄스 특성 평가	38
그림 4.7 광미분의 결과 및 펄스 위상	39
그림 5.1 비대칭형 광커플러의 단면도	42
그림 5.2 두 광섬유의 전파상수 특성	43
그림 5.3 비대칭형 광커플러의 광미분 개요도	44
그림 5.4 비대칭형 광커플러의 전달함수	49
그림 5.5 가우시안 펄스의 1차 광미분	50
그림 5.6 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분	51
그림 5.7 가우시안 펄스의 2차 광미분	52
그림 5.8 슈퍼-가우시안 펄스의 2차 광미분	53
그림 5.9 커플링 길이에 대한 대역폭 변화	55
그림 5.10 커플링 기울기에 대한 대역폭 변화	56
그림 5.11 대역폭 변화에 따른 1차 광미분기의 에너지 효율	57
그림 5.12 대역폭 변화에 따른 2차 광미분기의 에너지 효율	58
그림 5.13 제작된 비대칭형 광커플러	59
그림 5.14 비대칭형 광커플러의 전달함수 및 위상	61
그림 5.15 비대칭형 광 π 커플러의 입력 펄스 스펙트럼, 1차 광미분 펄스 스펙트럼, 간섭 펄스 스펙트럼	62
그림 5.16 비대칭형 광커플러를 이용한 1차 광미분의 크기, 세기, 위상	63
그림 5.17 대칭형 광커플러의 단면도	66
그림 5.18 대칭형 광커플러의 광미분 개요도	67
그림 5.19 대칭형 광커플러의 길이에 따른 $V(z)$, $U(z)$, $W(z)$ 함수 값	68
그림 5.20 대칭형 광커플러의 단면도	71
그림 5.21 단일과장 대칭형 광커플러의 전달함수	72
그림 5.22 확대된 단일과장 대칭형 광커플러의 전달함수	73
그림 5.23 가우시안 펄스의 1차 광미분	74

그림 5.24 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분	75
그림 5.25 다중과장 대칭형 광커플러의 전달함수	80
그림 5.26 확대된 다중과장 대칭형 광커플러의 전달함수 (1550nm)	81
그림 5.27 확대된 다중과장 대칭형 광커플러의 전달함수 (1310nm)	81
그림 5.28 가우시안 펄스의 1차 광미분 (1550nm)	82
그림 5.29 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분 (1550nm)	83
그림 5.30 가우시안 펄스의 1차 광미분 (1310nm)	84
그림 5.31 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분 (1310nm)	85

ABSTRACT

Design of optical differentiators based on optical waveguides

Hoe-Seok Jeong

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

Department of Photonic Engineering,
Graduate School of Chosun University

In this thesis, we have proposed a novel first-order and second-order optical differentiators based on symmetric directional coupler and asymmetric directional coupler. asymmetric directional couplers with dissimilar waveguides are designed for ultrafast optical differentiation within the femtosecond regime (corresponding to processing bandwidths > 10 THz). Theoretically proposed asymmetric directional coupler can be produced by wavelength matching of the propagation constants of two different waveguides in the coupler can be designed to achieve either a first-order differentiator or a second-order differentiator by properly fixing the product of coupling coefficient and coupling length of the coupler. We have demonstrated the first-order differentiation and the second-order differentiation of the design optical differentiator in simulations. We evaluated the differentiation errors and energetic efficiency of the design optical differentiator through numerical simulations. The proposed design has a strong potential to provide a feasible solution as an integrated differentiation unit device for ultrafast optical signal processing circuits. The symmetric directional coupler play a role of ultrafast optical differentiator operated at single-wavelength region and multi-wavelength regions due

to the fact that its transfer function is sinusoidally varying in frequency domain. Single-wavelength optical differentiator at 1550 nm and dual-wavelength optical differentiator at both 1310 nm and 1550 nm were designed with a symmetric directional coupler in specific condition. The proposed device has a potential for ultrafast optical differentiator which provides unparalleled performances in terms of wide bandwidth, easy fabrication, and multi-wavelength operation.

제1장 서 론

기존의 컴퓨터나 네트워크상에서 전기 신호 처리 기술에 의해 전자 계산이 이뤄지는데, 이 경우 처리 속도의 근본적인 한계를 가진다. 최근에 새로운 신호처리 기술 개발을 통한 계산 및 처리 속도 한계를 극복하기 위해 광학회로(all-optical circuit) 및 광컴퓨팅(all-optical computing)만을 이용한 전자 계산에 대한 관심이 높아지고 있다. 저항 및 트랜지스터와 같은 전자 부품을 결합하여 전기적인 미분기 또는 적분기 같은 전자계산기를 만들어 이용하듯, 다양한 광신호처리(all-optical signal processing) 기술을 이용하면 초고속 계산이 가능하다^[1].

광신호처리의 기본이 되는 기술로는 광미분기(all-optical differentiator)^[2], 광적분기(all-optical integrator)^[3], 광펄스 모양형성(pulse shaping)^[4] 기술 등이 있다. 특히 2006년 이후 광미분기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 기존에 개발된 광미분기는 공간섭계, 광증폭기, 광변조기, 장주기 광섬유 격자 등을 이용하여 제작되었다. 기존에 제안된 광시스템 기반 광미분기(공간섭계, 광증폭기, 광변조기)는 여러 가지 단점을 가지고 있다. 여러 광학 장치 및 소자를 이용하여 구성하는 기존 광시스템 기반 광미분기는 단위 소자형태로 구성하기 힘들며, 진동, 온도 등 외부 환경 영향에 특성이 쉽게 변하는 특징이 있다. 또한 시스템이 복잡하여 제작 및 구성비용이 많이 들며 대량생산의 어려움을 동반하게 된다.

장주기 광섬유 격자 기반 광미분기는 크게 세 가지의 문제점을 가지고 있다^[5]. 첫째, 파장 가변의 문제점이다. 인장력을 이용하여 중심 파장을 조금 조절할 수 있지만 근본적인 파장 가변 광미분기로 사용은 어려움이 있다. 둘째, 파장 대역폭 가변의 어려움. 기존 광미분기는 사용 가능한 파장 대역이 고정되어 있다. 따라서 입력되는 광펄스의 대역폭이 광미분기의 대역폭보다 넓은 경우 완전하게 미분이 되지 않는다. 셋째, 기존 광미분기의 경우, 광미분기의 중심파장에서 최소 -50 dB 이상의 광학 손실을 발생시켜야 한다. 광미분기의 중요한 요건 중 하나는 광미분의 중심 파장에서 최대 손실이 발생해야 한다는 것이다. 만약 조금이라도 중심파장에 빛이 존재하면 전달함수에서 잔존하는 DC성분 때문에 완벽한 미분을 얻을 수 없다. 이러한 값을 가진 장주기 광섬유 격자 제작은 현실적으로 쉽지 않다. 또한 공간섭계의 경우 완벽한 대비를 가져야 광미분이 가능한데, 공간섭계는 외부 환경 변화에 민감한 불안정한 시스템이기 때문에 역시 쉽지 않다^[6]. 기존에 제안된 여러

형태의 광미분기의 경우 많은 단점들 때문에 앞에서 언급한 문제점들을 극복할 수 있는 다른 형태의 광미분기 개발이 필요하다.

본 논문에서는 비대칭형 광커플러를 이용한 광미분기와 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기를 제안하였다. 제안된 광미분기는 단위 소자화 할 수 있는 장점이 있어 외부 환경 영향에 특성 변화가 적고, 구성 및 제작이 용이하다. 또한, 제작조건을 확보하게 되면 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 본 논문에서는, 이러한 새로운 형태의 광미분기를 이론적으로 디자인하고 시뮬레이션을 통해 특성을 평가하였다.

제2장 이 론

제1절 광미분 원리

광미분기에 대한 기본적인 동작 원리는 시간상에서 광펄스의 전기장을 미분하게 되며, 수학적으로 미분(differentiation)은 임의의 함수($f(x)$)의 각 변위(x)에 대한 기울기(df/dx)로 정의된다. 광미분기(optical differentiator)는 시간상에서 짧은 시간 폭을 가진 광펄스(optical pulse)의 전기장(electric field)을 미분한다. 그림 2.1은 광미분의 개념을 설명한 것이다. 입력된 광펄스는 미분의 기능을 가진 특정한 광학 소자 또는 시스템인 광미분기를 통과한 후 미분된 전기장과 위상을 가진 광펄스로 출력된다. 이러한 시간상의 미분을 주파수 영역에서 보면 미분된 전기장은 광미분기의 전달함수(transfer function, TF)와 입력된 광펄스 스펙트럼의 전기장의 곱으로 나타낼 수 있다. 입력 광펄스를 수학적 방법으로 1차, 2차 미분을 진행하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t} e^{-i(\omega-\omega_0)t} &= -i(\omega-\omega_0) e^{-i(\omega-\omega_0)t} \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} e^{-i(\omega-\omega_0)t} &= -(\omega-\omega_0)^2 e^{-i(\omega-\omega_0)t}\end{aligned}\quad (2.1)$$

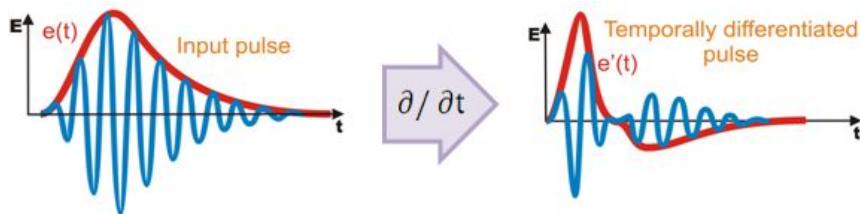
여기서 i 는 $\sqrt{-1}$ 를 나타내고, ω_0 는 입력 신호의 광주파수를 나타낸다. 입력 펄스 식에 대한 수학적 1차 미분을 풀어보면 입력펄스와 1차 함수($-i(\omega-\omega_0)$)의 곱으로 정의되며, 2차 미분은 입력펄스와 2차 함수($-(\omega-\omega_0)^2$)의 곱으로 정의된다. 광미분기의 전달함수가 1차 함수와 2차 함수 형태를 가지게 되면 식 2.1에서 알 수 있듯이 입력펄스와 각 전달함수의 곱으로 1차와 2차 광미분을 진행할 수 있다. 광미분기의 전달함수가 그림 2.2와 같이 광주파수의 1차 함수 형태로 표현되며 1차 광미분기의 전달함수는 직선 형태로 나타나게 되고, 1차 광미분기의 스펙트럼 세기는 포물선 형태로 나타나게 된다. 따라서 입력 광펄스의 광주파수가 1차 함수 형태

의 전달함수를 가진 광미분기를 지나면 1차 미분된 광펄스를 얻게 된다. 즉, 1차 광미분기와 2차 광미분기의 전달함수 형태는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{1차 미분 전달함수: } & -i(\omega - \omega_0) \\ \text{2차 미분 전달함수: } & i(\omega - \omega_0)^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

광미분기 원리의 핵심은 1차, 2차 광미분기가 식 2.2에서처럼 각각의 1차, 2차 함수형태의 전달함수를 가지도록 광미분기를 설계하는 것이다. 일반적으로 광소자의 특성은 전기장이 아닌 빛의 세기로 측정되어진다. 측정을 통해 얻어진 전달함수는 제곱의 형태로 나타나며, 이를 확인하면 광미분의 기능을 가진 광미분기의 특성을 확인할 수 있다. 따라서 파장역역에서 투과 특성이 중심파장에서 0이 되며, 파장 또는 광주파수 영역에서 포물선 함수 형태인 광학필터가 광미분기로 역할을 할 수 있다. 그림 2.3에서처럼 특정한 전달함수를 가진 광필터에 임의의 스펙트럼을 가진 광펄스를 통과 시키면 미분된 스펙트럼을 가진 시간상에서 미분된 광펄스를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 이러한 미분원리를 이용해서 비대칭형 광커플러가 1차, 2차 광미분기로, 대칭형 광커플러가 1차 광미분기로 사용할 수 있음을 실험 및 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

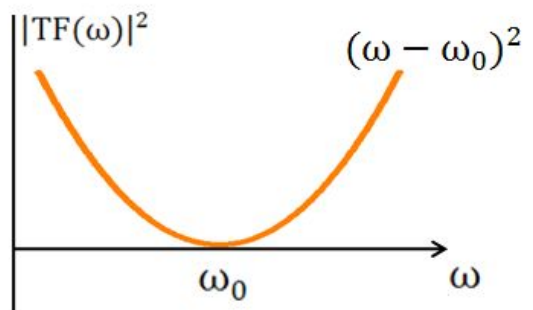
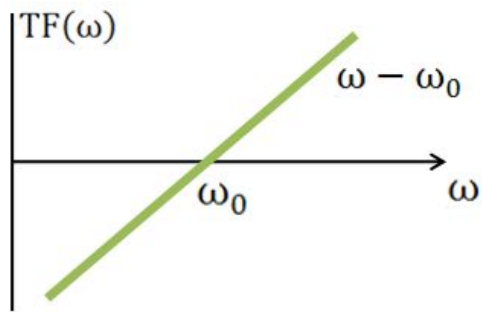


$$E(t) \longrightarrow \boxed{\partial / \partial t} \longrightarrow E_{\text{diff}}(t) \quad (\text{in temporal domain})$$

$$\tilde{E}(\omega) \longrightarrow \boxed{\text{TF}(\omega)} \longrightarrow \tilde{E}_{\text{diff}}(\omega) \quad (\text{in spectral domain})$$

$$\begin{aligned} \tilde{E}_{\text{diff}}(\omega) &= \text{TF}(\omega) \cdot \tilde{E}(\omega) \\ &= -i(\omega - \omega_0) \cdot \tilde{E}(\omega) \end{aligned}$$

그림 2.1 광미분의 개념도



$$\tilde{E}_{\text{diff}}(\omega) = \text{TF}(\omega) \cdot \tilde{E}(\omega)$$

(electric field)

$$|\tilde{E}_{\text{diff}}(\omega)|^2 = |\text{TF}(\omega)|^2 \cdot |\tilde{E}(\omega)|^2$$

(spectral intensity)

그림 2.2 광미분기의 전달 함수

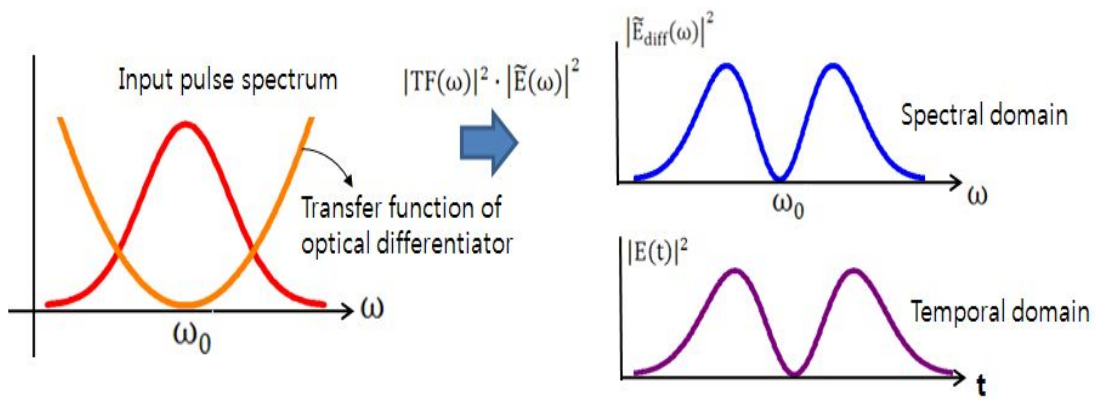


그림 2.3 광미분의 원리

제3장 기존 광미분기 종류

제1절 장주기 광섬유 격자를 이용한 광미분기

장주기 광섬유 격자는 잘 알려진 파장 영역 광학필터이다. 장주기 광섬유 격자는 그림 3.1처럼 광섬유에서 코어 모드와 클래딩 모드간의 상호 작용에 의한 커플링을 기반으로 한 투과 필터로 널리 활용되는 광학 소자이다^[2]. 장주기 광섬유 격자를 제조하기 위해서는 그림 3.2처럼 격자 주기가 수백 μm 정도로 상당히 길어야 하며 코어 모드와 클래딩 모드의 커플링 현상에 의해 공진 조건을 만족하는 파장대의 광신호가 반사되지 않고 투과 스펙트럼 상에 손실로써 나타나야 한다. 굴절률 변화 주기가 단주기 광섬유 격자(fiber bragg grating, FBG)에 비해 매우 길어 제조 방법이 간단하고, 대량생산이 용이하며, 삽입 손실이 적고, 역방향 반사율이 작다는 장점을 가지고 있다.

앞에서 살펴봤던 광미분기의 전달함수는 1차 광주파수 함수로서 전기장 진폭이 광주파수에 대하여 선형인 영역에서 미분기로 작용한다^[2]. 그림 3.3에서 장주기 광섬유 격자의 투과스펙트럼을 보면 전달함수 중 선형인 영역(usable bandwidth)이 광미분기로 사용 가능한 전달함수가 된다. 이 전달함수 안에 분포하는 스펙트럼을 가진 광펄스는 광학적 미분이 가능하다. 그림 3.4 (a)에서 실선은 장주기 광섬유 격자의 1차 미분 전달함수를 나타내며 점선은 1차 함수 형태의 이상적인 1차 미분 전달함수를 나타낸다^[2]. 여기서 실선과 점선이 겹쳐지는 부분이 제작된 장주기 광섬유 격자에서 미분이 가능한 부분이 된다. 그림 3.4 (b)는 2차 미분이 가능한 장주기 광섬유 격자의 전달함수이다. 실선은 2차 미분 전달함수이고, 점선은 2차 함수 형태의 이상적인 2차 미분 전달함수이다. 2차 미분 전달함수는 입력펄스가 1차 미분이 가능한 장주기 광섬유 격자를 왕복할 수 있도록 미분기 시스템을 구성하면 하나의 장주기 광섬유 격자를 이용하여 2차 미분이 가능한 2차 미분 전달함수를 얻을 수 있다. 이 1차, 2차 전달함수 대역폭 안에 펄스를 위치시켜 1차, 2차 광미분된 펄스를 얻을 수 있다. 실제 장주기 광섬유 격자를 이용하여 1차 미분과 2차 광미분을 진행하면 그림 3.5처럼 미분된 펄스를 얻을 수 있다.

이렇게 전통적인 노치필터(notch filter)인 장주기 광섬유 격자가 1차, 2차 광미분기로 기능을 할 수 있다^[2]. 실제 장주기 광섬유 격자를 이용하여 그림 3.6처럼 광미분기 시스템을 구성하게 된다^[10]. 장주기 광섬유 격자로 구성된 도파로에 펄스를 통과시키면 미분된 펄스만 구할 수 있고, 위상정보를 구하기 위해 광 커플러를 이용하여 미분이 발생하

는 광미분 부분과 미분이 일어나지 않는 부분으로 입력펄스를 분기시켜 다시 하나의 빛으로 합쳐주게 된다^[10]. 이 때 장주기 광섬유 격자를 이용한 미분펄스와 미분이 일어나지 않은 입력펄스가 간섭을 일으켜 간섭신호를 발생시키게 되며, 이 간섭신호를 푸리에 변환을 통해 시간 영역에서 보면 그림 3.7처럼 미분된 펄스와 위상정보를 얻을 수 있다^[10]. 또한 장주기 광섬유 격자 광미분 시스템을 이용하면 샘플 광섬유의 분산특성을 측정할 수 있다. 그림 3.6처럼 샘플 광섬유를 광미분 시스템에 위치시켜 광미분을 진행하면 분산특성이 포함된 1차 미분 펄스와 위상정보를 측정할 수 있게 된다^[10].

장주기 격자를 이용한 2차 광미분은 1차 미분의 기능을 가진 장주기 광섬유 격자를 2번 통과하면 2차 미분된 펄스를 얻을 수 있다. 2개의 장주기 격자를 사용하지 않고 그림 3.9와 같이 미러와 서큘레이터를 이용하여 입력펄스가 하나의 장주기 광섬유 격자를 왕복할 수 있도록 미분기를 구성하여 2차 광미분을 진행하게 된다. 입력펄스가 장주기 광섬유 격자를 한번 통과하면 그림 3.10 (a)와 같이 1차 미분된 광펄스를 얻을 수 있고, 장주기 광섬유 격자를 왕복할 수 있도록 광미분기 시스템을 구성하여 2차 미분된 광펄스를 얻게 된다. 또한, 입력펄스와 미분된 광펄스를 간섭이 일어나도록 구성하여 위상정보를 얻을 수 있다.

이처럼 기존에 제안된 장주기 광섬유 격자를 이용한 광미분기는 입력 펄스에 대해 1차 미분의 기능을 가지게 되며, 미분펄스와 입력펄스 간에 간섭신호를 푸리에 변환을 통해 위상정보를 얻을 수 있다. 또한 1차 미분이 가능한 장주기 광섬유 격자를 광학 소자와 함께 광미분기 시스템을 이용해 2차 미분이 가능한 광미분기 시스템을 구성할 수 있다. 장주기 광섬유 격자를 이용한 광미분기는 단위소자로 활용이 가능하나 광섬유 소자의 특성상 대량생산이 쉽지 않고, 외부 온도에 의해 특성이 쉽게 변하는 단점이 있다.

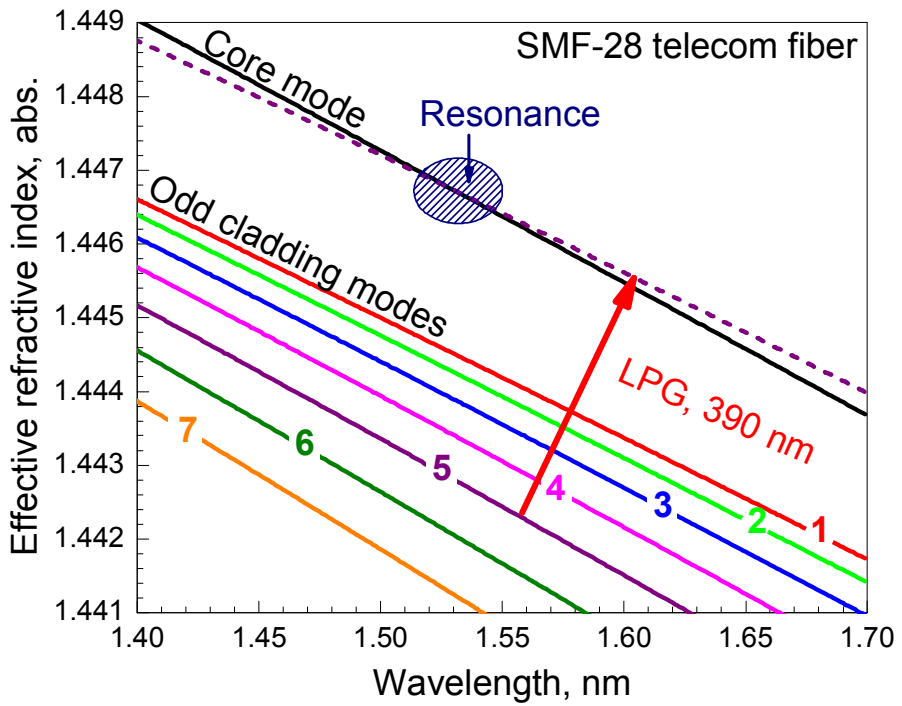


그림 3.1 장주기 광섬유 격자의 모드 개략도^[2]

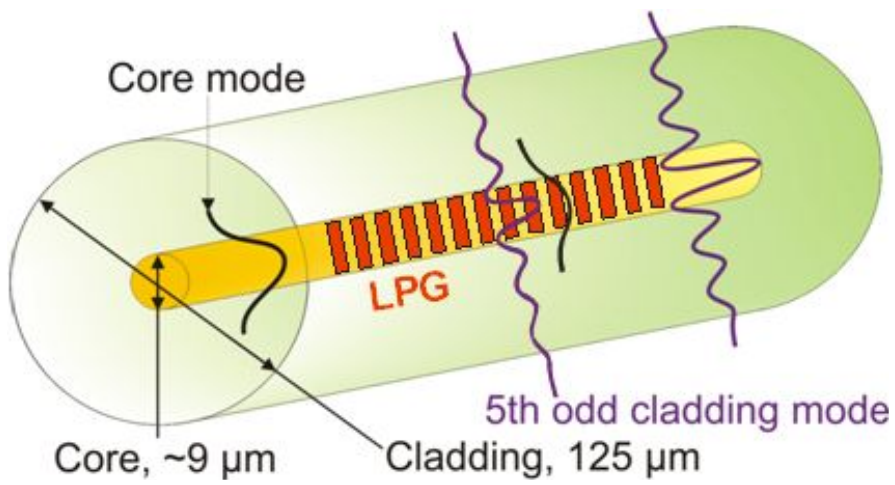


그림 3.2 장주기 광섬유 격자의 구조 개략도^[2]

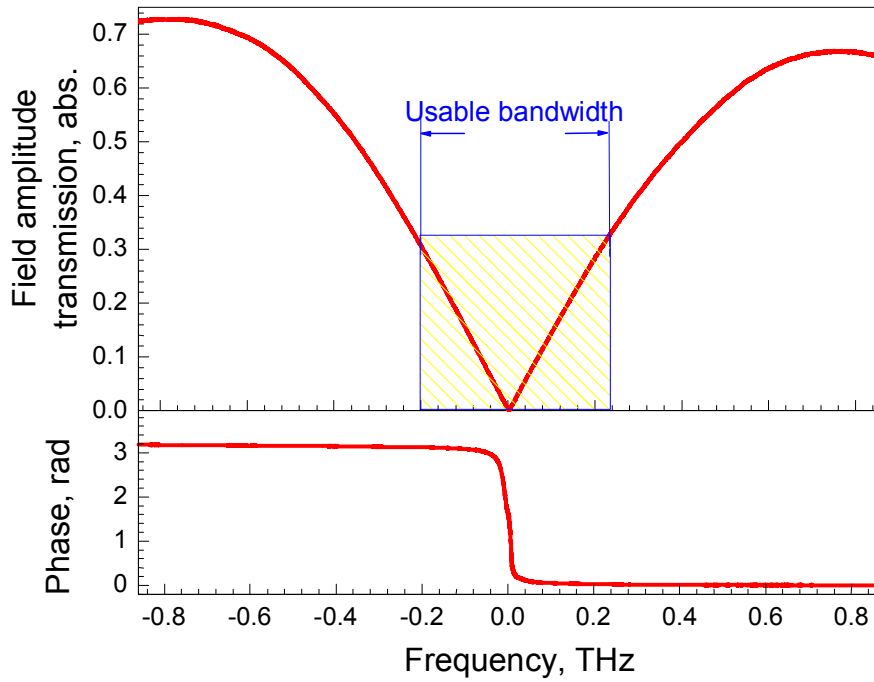


그림 3.3 장주기 광섬유 격자 투과 스펙트럼의 전기장 진폭과 위상^[2]

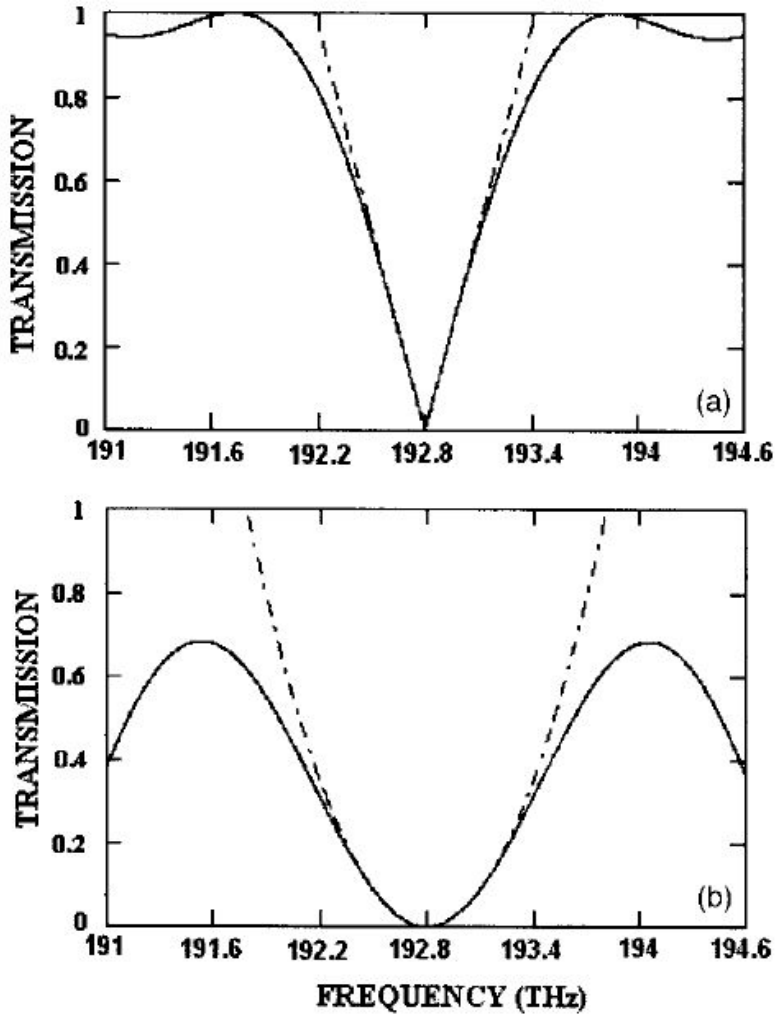


그림 3.4 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차미분 전달함수 (a), 장주기 광섬유 격자를 이용한 2차미분 전달함수 (b)^[2]

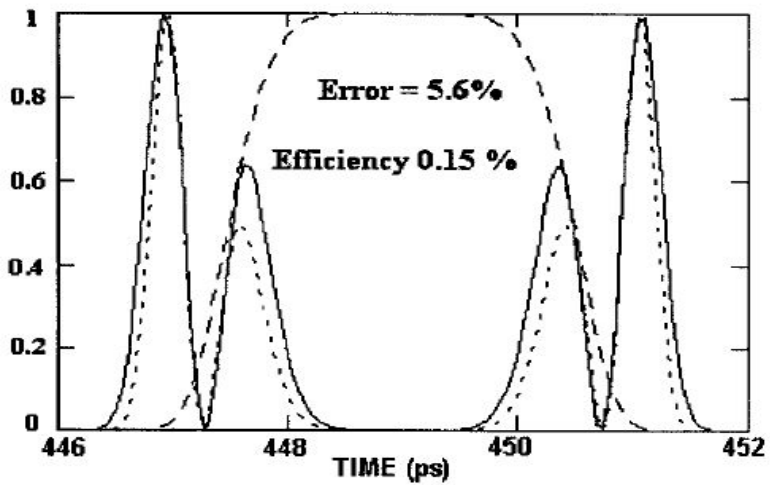
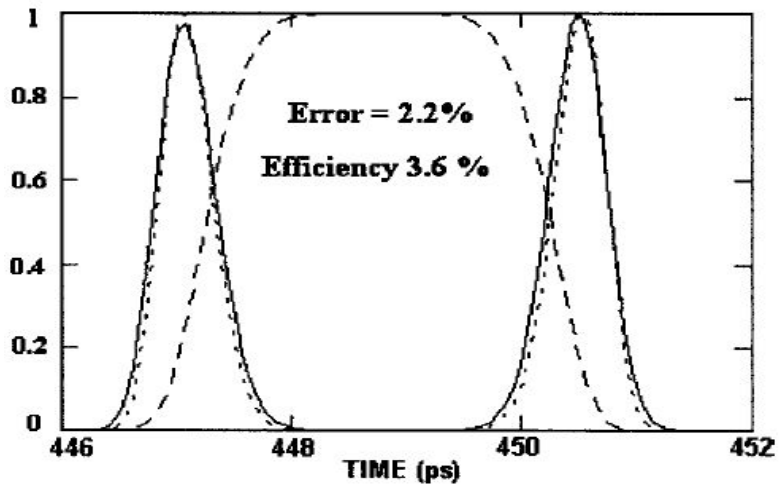


그림 3.5 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차 광미분(a),
장주기 광섬유 격자를 이용한 2차 광미분(b)^[2]

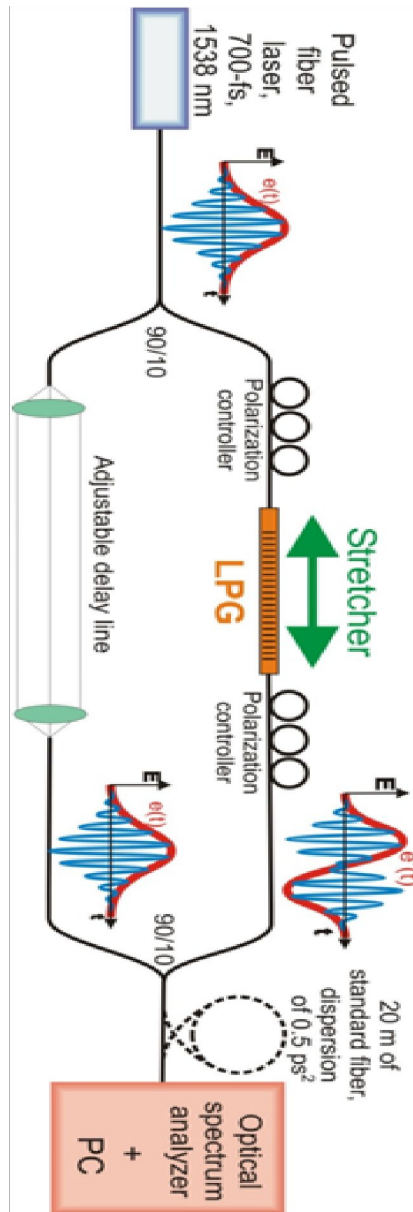


그림 3.6 장주기 광섬유 격자를 이용한 광미분기 시스템^[10]

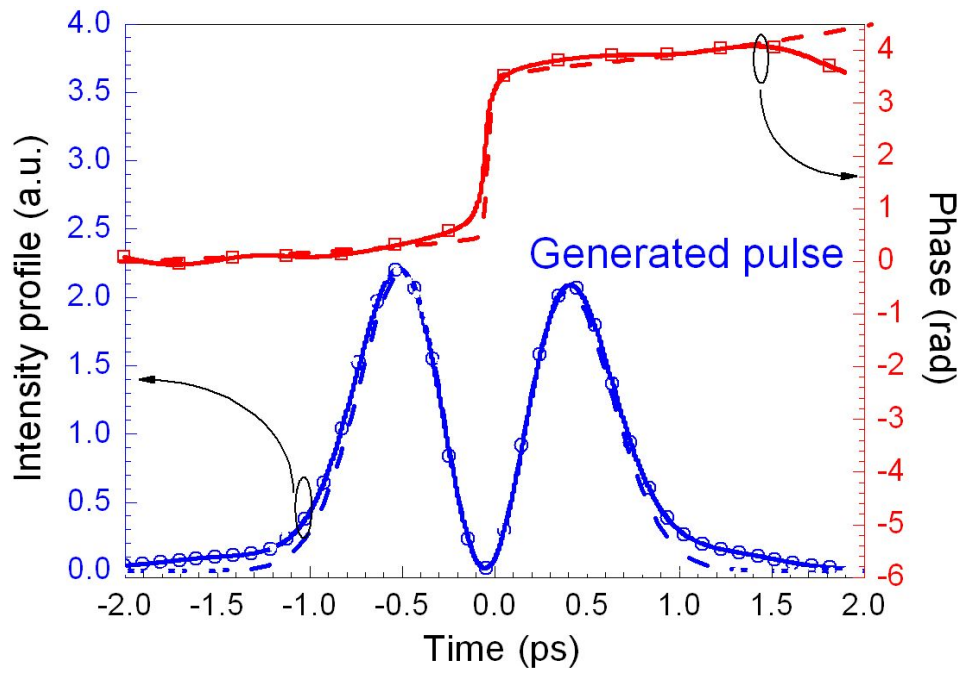


그림 3.7 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차 광미분^[10]

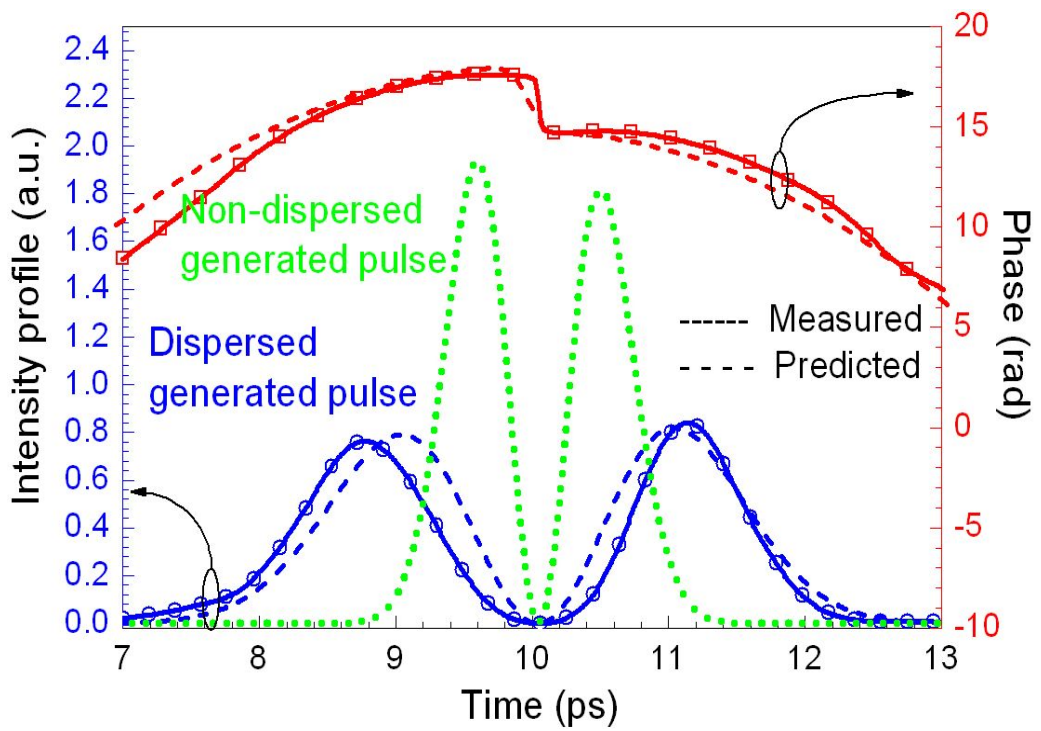


그림 3.8 분산특성이 포함된 1차 광미분^[10]

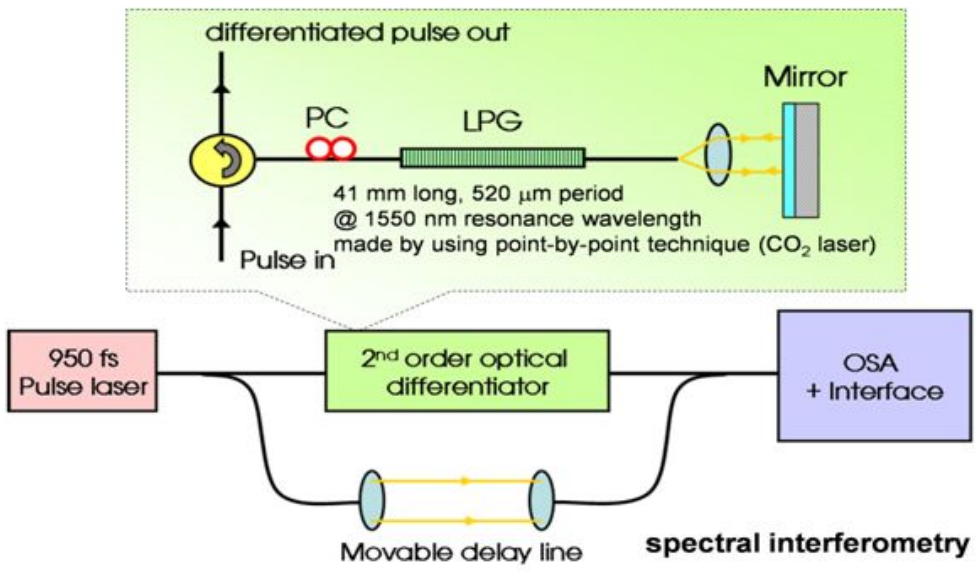


그림 3.9 장주기 광섬유 격자를 이용한 2차 광미분 개요도^[11]

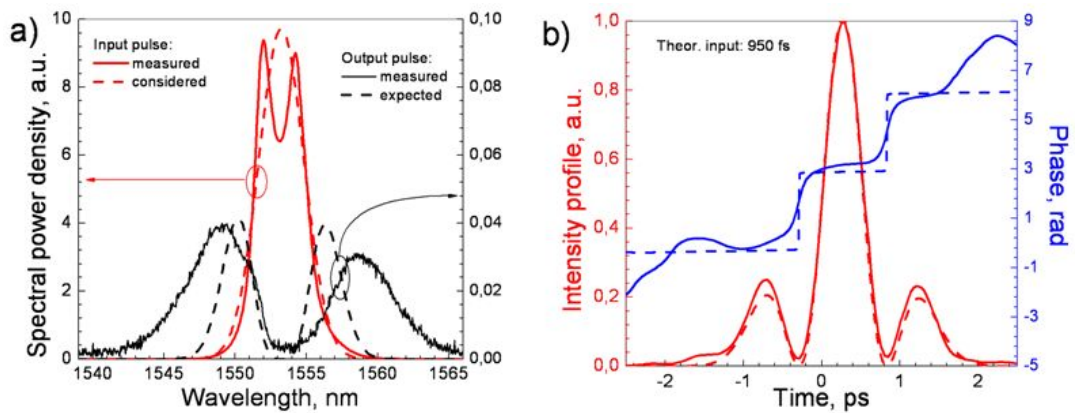


그림 3.10 장주기 광섬유 격자를 이용한 1차, 2차 광미분^[11]

제2절 실리콘 마이크로링 공진기를 이용한 광미분기

반도체소자 제작공정을 통해 마이크로링 공진기를 제작하면 특정한 파장에서 공진(resonance)이 발생하게 된다. 이렇게 발생된 파장 특성은 광미분기의 전달함수와 동일하여 실리콘 마이크로링 공진기가 광미분기로 이용되고 있다^[12]. 실리콘 마이크로링 공진기는 수백 마이크로 두께의 도파로로 구성되며, 주파수 영역에서 전달함수 중 1차 함수형태인 $j(\omega-\omega_0)$ 를 포함하게 된다. 이렇게 발생된 파장 특성은 광미분기의 전달함수와 동일하여 실리콘 마이크로링 공진기가 광미분기로 이용되고 있다. 그림 3.11에서 보는 것처럼 마이크로링 공진기의 반경은 40 μm , 두께는 450 nm이며 수백 nm의 도파로로 구성되어 있다. 도파로와 공진기 사이는 90 nm의 공기층이 형성되어 있으며, 여기서 커플링이 일어나 광미분을 할 수 있는 전달함수를 가지게 된다. 이 때의 전달함수는 그림 3.12처럼 장주기광섬유 격자와 같은 1차 함수 형태를 가지게 되어 광미분기로 사용할 수 있게 된다. 그림 3.14는 제작된 마이크로링 공진기의 전달함수와 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 미분을 나타낸다. 슈퍼-가우시안 펄스를 마이크로링 공진기의 입력펄스로 사용하여 1차 미분된 펄스를 확인할 수 있다. 이처럼 마이크로링 공진기는 광미분기로 사용할 수 있다.

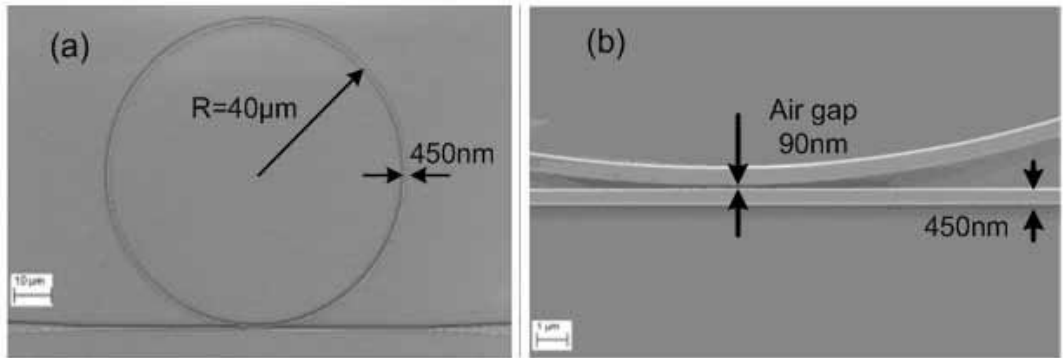


그림 3.11 마이크로링 공진기 구조^[12]

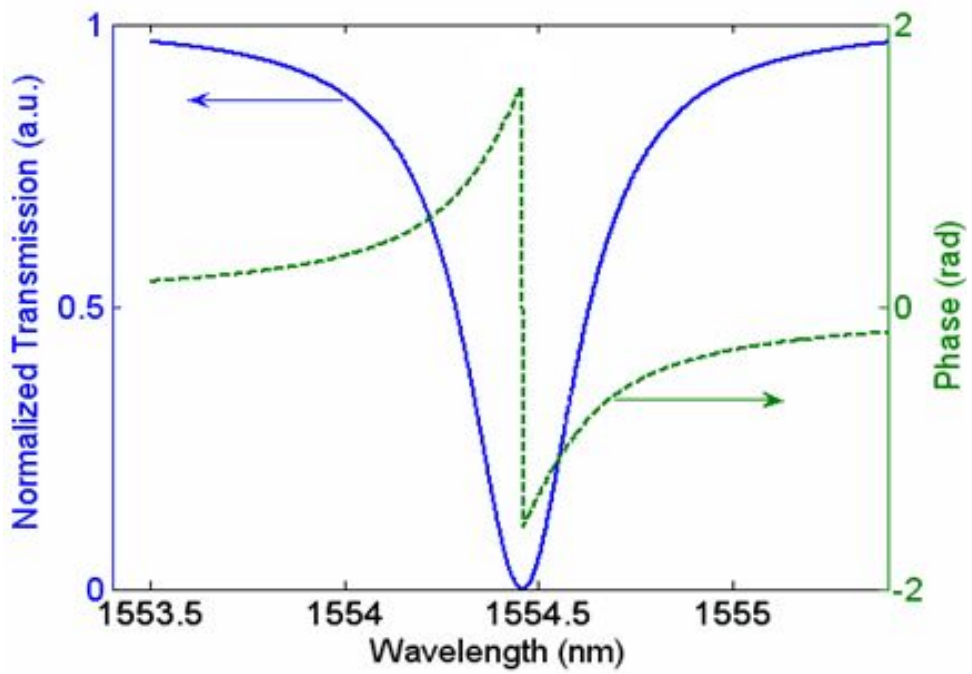


그림 3.12 마이크로링 공진기 전달함수^[12]

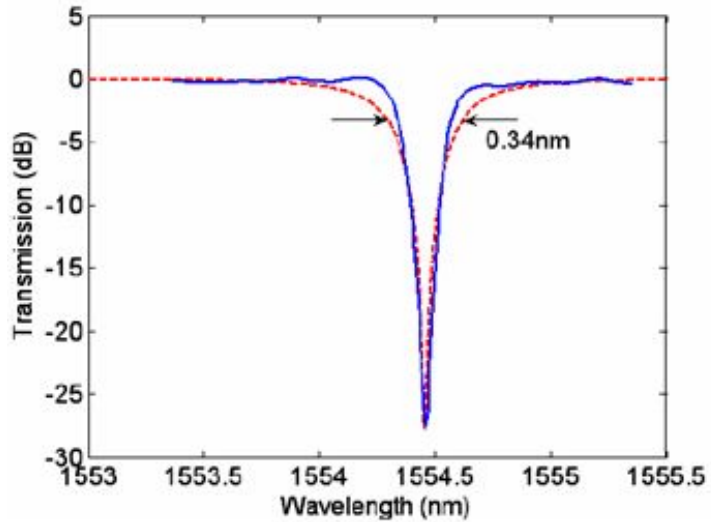


그림 3.13 제작된 마이크로링 공진기 전달함수^[12]

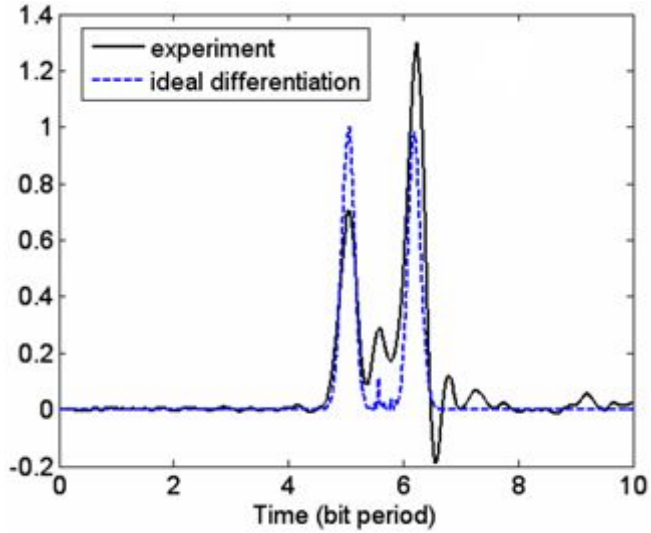


그림 3.14 마이크로링 공진기를 이용한 1차 광미분^[12]

제3절 공간섭계를 이용한 광미분기

과장 필터로 사용할 수 있는 공간섭계(optical interferometer)를 이용하여 광미분을 할 수 있다. 간섭계의 경로차이(τ)에 따라 과장영역에서 주기적인 간섭 파형을 얻게 되고, 그 중에서 한 주기만 보면 장주기 광섬유 격자에서와 같이 과장 간섭 파형에서 선형인 영역에서 광미분기로 기능을 할 수 있다^[6]. 기존 제안된 공간섭계를 이용한 광미분기에서는 마이켈슨 간섭계(Michelson's interferometer)를 구성하여 광미분을 진행하였다. 마이켈슨 간섭계는 한 점광원을 반 도금된 거울을 통하여 둘로 나누어 경로차이가 생기게 한 후 다시 만나게 하는 구조로 되어 있다. 그림 3.15에서 보는 것처럼 광 분할기(beam splitter)를 이용하여 입력된 빔을 각각의 경로로 나누어 주고 2개의 거울을 이용하여 나누어진 빔을 다시 합쳐주게 된다. 이때 두 거울사이의 경로차가 생기게 하여 간섭 파형을 얻을 수 있다. 광 경로차가 서로 다른 두 빛이 만나 스펙트럼 상에 간섭무늬를 만들게 되고, 이 때 두 경로차의 빛의 세기를 최대한 동일하게 유지하면 원하는 포물선 형태의 전달함수를 얻을 수 있다. 두 광 경로차를 조절하면 간섭무늬의 중심과장을 이동시키거나 대역폭을 조절 할 수 있다.

그림 3.16은 마이켈슨 공간섭계에서 발생된 간섭무늬의 한 주기를 보여주고 있다^[6]. 간섭무늬의 한주기만 보면, 장주기 광섬유 격자에서처럼 선형부분을 포함한 전달함수 형태로 나타나게 된다. 이 선형부분이 1차 미분의 기능을 가지는 부분이며 광미분의 역할을 할 수 있다. 또한 상쇄간섭의 중심에서 광미분이 발생하게 되어 180도 위상 차이를 유도하게 된다. 그림 3.17는 마이켈슨 공간섭계를 이용해 가우시안 펄스를 1차 미분한 결과이다^[6]. 미분이 진행되어 입력펄스의 중심에서 180도의 위상이 바뀌는 것을 알 수 있다. 이러한 마이켈슨 공간섭계가 1차 광미분기로 사용될 수 있으며, 1차 미분의 기능을 가지는 마이켈슨 공간섭계 2개를 이용하여 2차 광미분이 가능하다. 그림 3.18처럼 마이켈슨 공간섭계를 연결하면 1차 미분된 펄스가 두 번째 마이켈슨 공간섭계를 지나면서 한번더 미분이 되어 2차 미분된 펄스가 출력되게 된다^[6]. 그림 3.19은 마이켈슨 공간섭계를 이용하여 가우시안 펄스를 2차 미분한 결과이다. 2차 미분이 진행되면서 360도의 위상이 바뀌는 것을 알 수 있다. 마이켈슨 공간섭계를 1차, 2차 광미분기로 사용할 수 있지만, 여러 광학부품을 사용하기 때문에 구조가 복잡하고, 제작비용이 많이 들게 된다^[6].

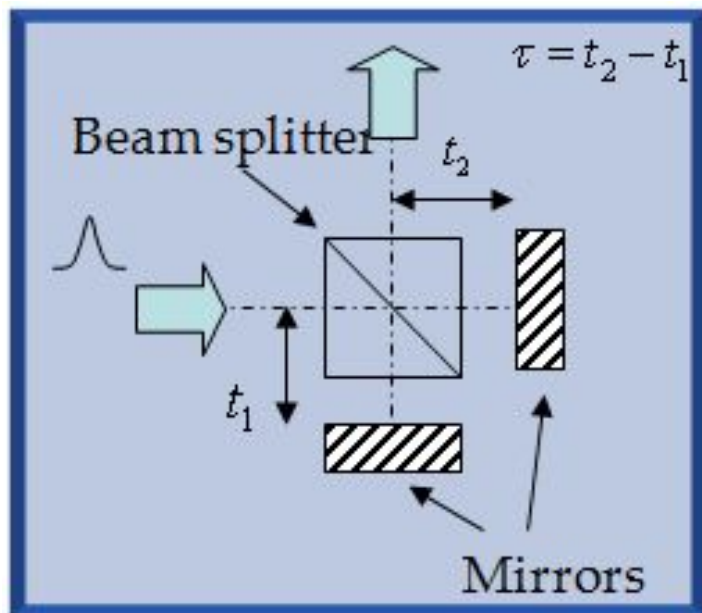


그림 3.15 마이켈슨 광간섭계의 1차 광미분 개략도^[6]

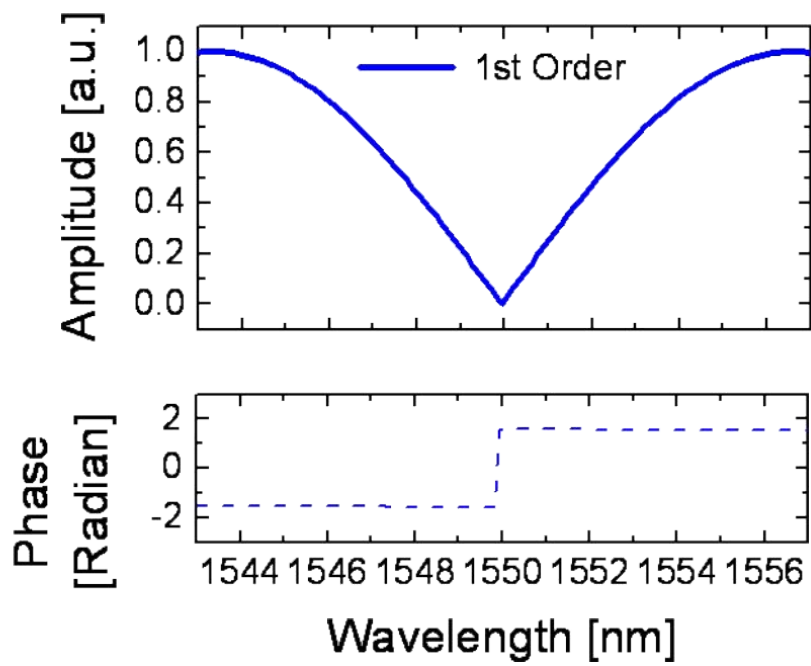


그림 3.16 마이켈슨 광간섭계의 전기장 진폭과 위상^[6]

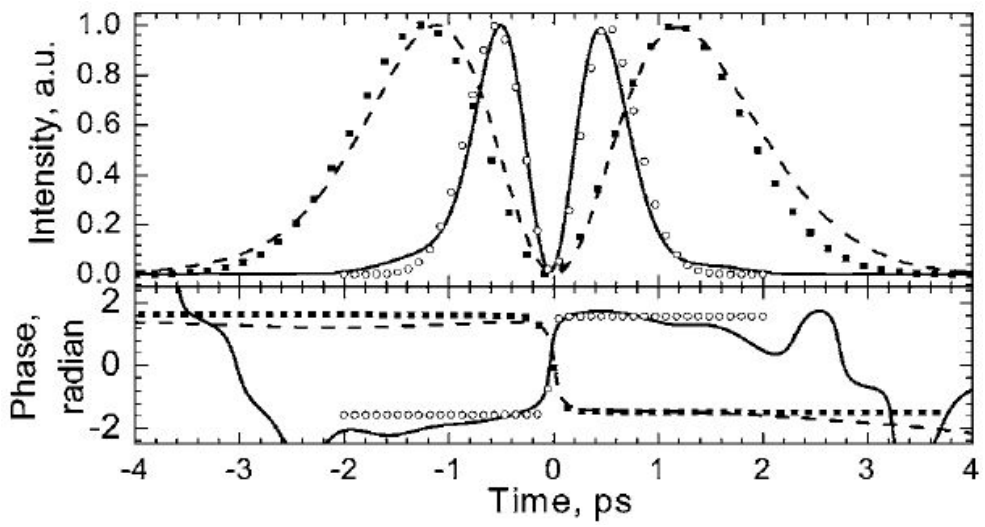
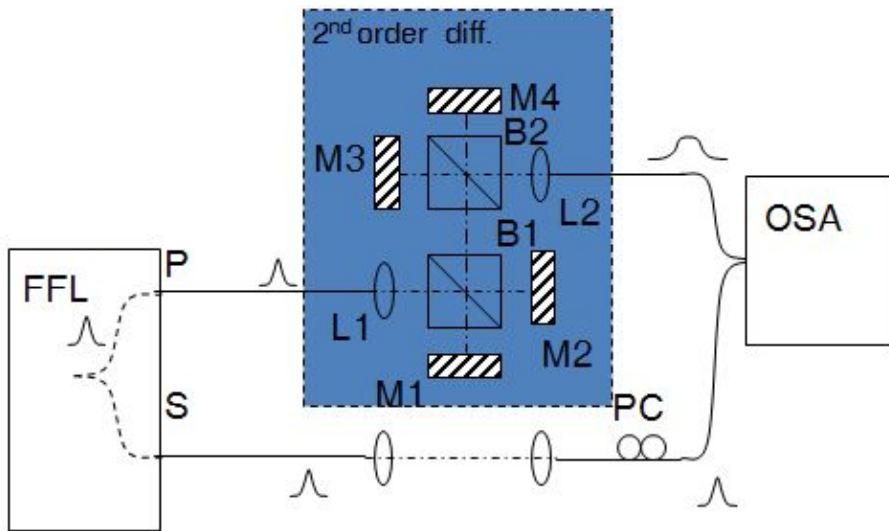


그림 3.17 마이켈슨 광간섭계의 1차 광미분과 위상^[6]



- FFL: Femtosecond fiber laser (passively mode-locked laser)**
P: Primary output
L: Collimating lens
B: Beam splitter
OSA: Optical spectrum analyzer
- S: Secondary output**
M: Mirror
PC: Polarization controller

그림 3.18 마이켈슨 광간섭계의 2차 광미분 개략도^[6]

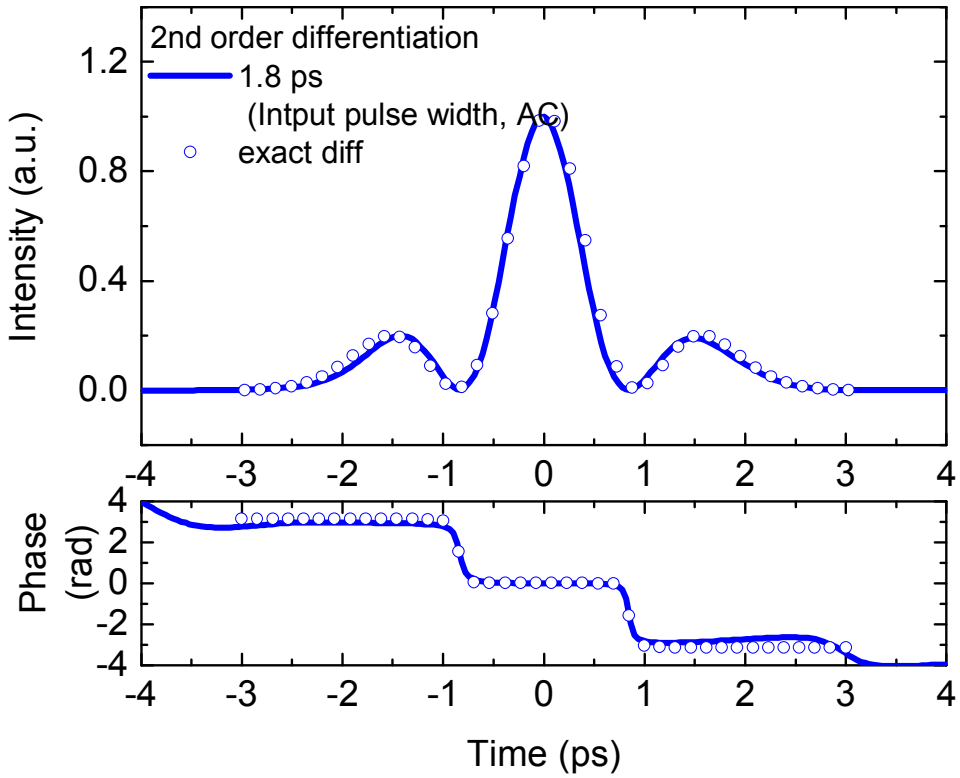


그림 3.19 마이켈슨 광간섭계의 2차 광미분과 위상^[6]

제4장 응용분야

제1절 평탄형 펄스 생성기

수학적으로 임의의 함수를 테일러(Taylor) 전개를 통해 N 차 미분들의 합으로 근사할 수 있듯이, 광미분기를 통해서 얻은 광펄스를 합하여 임의의 형태를 가진 광신호를 얻을 수 있다. 평탄형 펄스 생성을 위해 N 차 광미분기 연구가 활발히 진행 중에 있다. 그림 4.1은 초기가우시안 펄스와 1차 미분된 펄스의 합을 통해 평탄한 펄스를 만드는 원리를 보여준다^[13]. 입력 펄스의 중심에 광미분기의 전달함수를 위치시켜 광미분을 하게 되면, 그림 4.1 (a)와 같이 입력펄스에 대해 미분된 펄스만 출력되게 된다. 또한 광미분기의 전달함수를 입력펄스 중심에서 $\Delta\omega$ 만큼 약간 이동(detuning)시켜 광미분을 하게 되면, 그림 4.1 (b)와 같이 미분이 진행되면서 입력 펄스 성분이 미분된 펄스와 함께 출력되게 된다. 전달함수의 이동량을 조절하여 광미분을 진행하면 특정한 지점에서 그림 4.1(c)와 같이 평탄형 펄스를 생성할 수 있게 된다. 이론적으로 설명한 평탄형 펄스 생성원리를 장주기 광섬유 격자 광미분기에 적용해 보면 그림 4.2와 같이 평탄형 펄스를 생성할 수 있다^[14]. 장주기 광섬유 격자 광미분기의 전달함수를 입력 펄스 중심파장에서 이동시켜 광미분을 진행하게 된다. 이렇게 생성된 평탄형 펄스는 그림 4.3과 같이 가우시안 입력 펄스와 미분된 펄스의 합을 통해 평탄한 펄스를 만들게 된다^[14]. 고차 미분 펄스까지 고려하면 완벽한 평탄형 펄스를 만들 수 있다. 수학적 이론을 자연 광학에서 실현할 수 있어 초고속 광컴퓨팅, 광신호처리, 임의의 광신호 모양형성 등 다양한 분야에 응용할 수 있다.

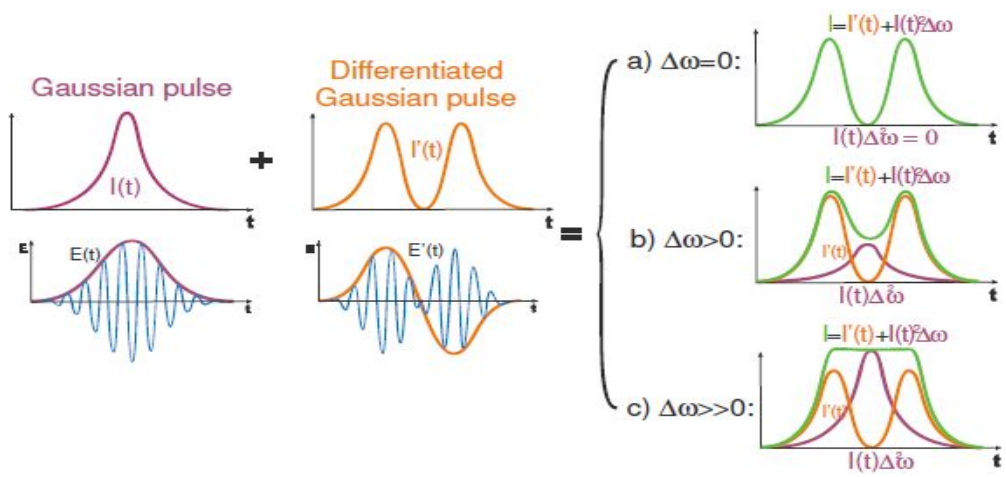


그림 4.1 평탄형 광펄스의 생성원리^[13]

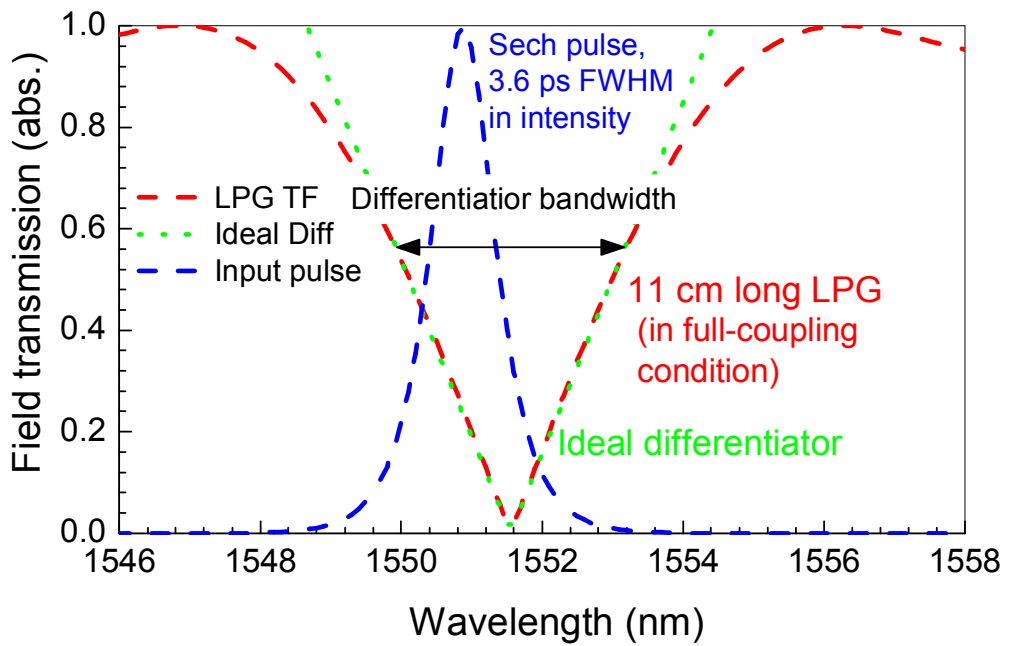


그림 4.2 평탄형 펄스를 만들기 위한 펄스 스펙트럼과
 광미분기 전달함수(중심파장이 일치 하지 않도록 조정함)^[14]

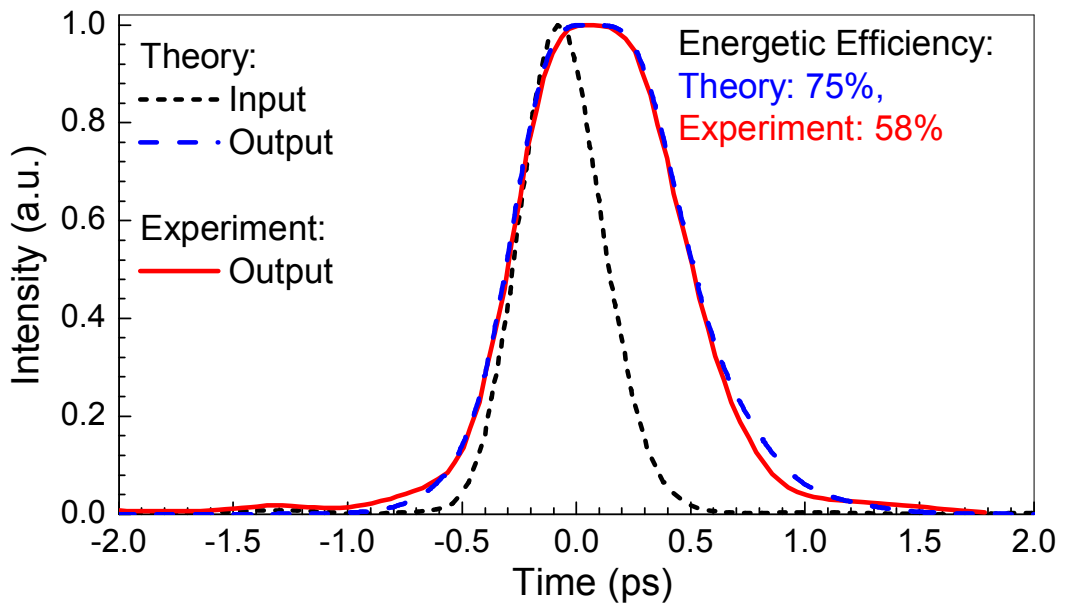


그림 4.3 장주기 광섬유 격자를 이용한 평탄형 광펄스^[14]

제2절 초고속 광통신 응용

광미분기는 640 Gb/s OTDM(Optical Time Division Multiplexed system) 시스템에 응용하여 광통신에서 timing tolerance을 개선하여 초고속 광통신에 응용하고 있다^[15]. 1차 광미분기인 장주기 광섬유 격자를 이용하여 평탄형 광신호를 만들어 640 Gb/s OTDM 광통신 시스템에 적용할 경우 통신 성능이 상당히 향상되어 초고속 통신이 가능하게 된다. 그림 4.4는 640 Gb/s OTDM 광통신 시스템의 개요도이다. 평탄형 광신호를 만들기 위해 1차 미분의 기능을 가지는 장주기 광섬유 격자를 이용하여 평탄형 펄스 생성기를 구성하여 미분된 펄스를 생성하게 된다. 평탄형 펄스는 가우시안 펄스보다 시간 오차를 줄여주어 초고속 통신에서 통신 성능이 향상된다. 그림 4.5는 640 Gb/s 비트 오차율 커브를 타나낸다. 640 Gb/s 펄스에서 평탄형 펄스가 가우시안 펄스보다 통신 성능이 향상된 것을 알 수 있고, 320 Gb/s에서도 평탄형 펄스가 가우시안 펄스보다 성능이 우수한 것을 알 수 있다^[15]. 이렇게 광미분기는 초고속 광통신에 응용할 수 있으며, 광통신과 같은 실제 산업에 응용이 가능한 기술이다.

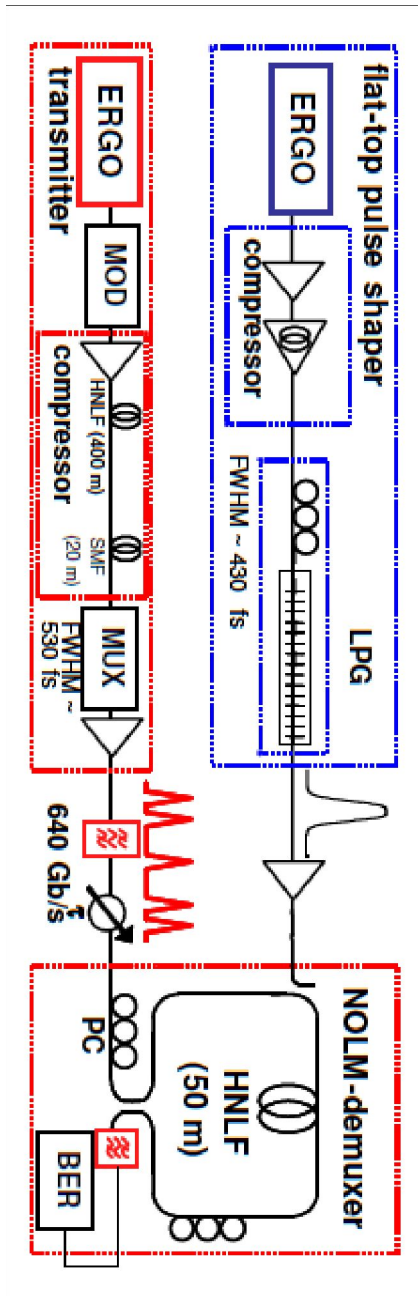


그림 4.4 640 Gb/s OTDM 광통신 시스템^[15]

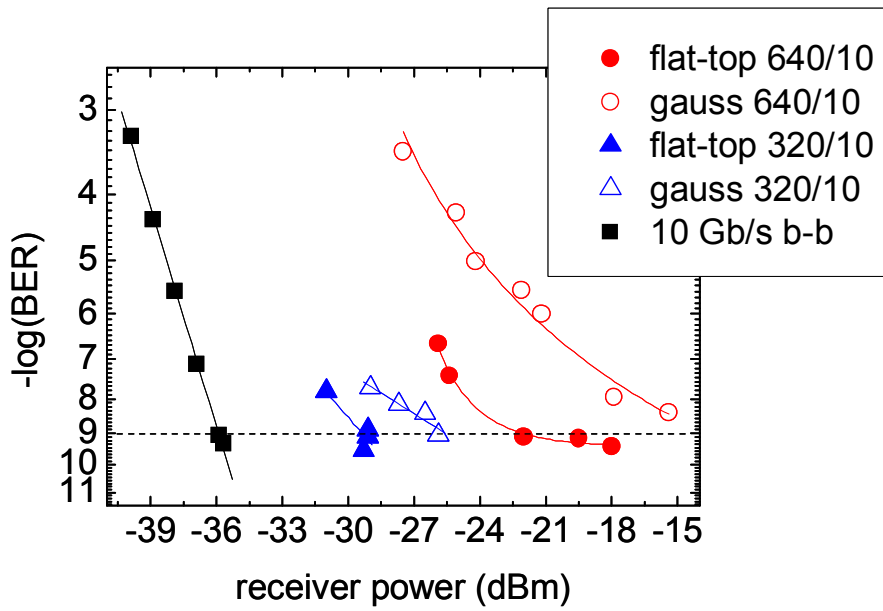


그림 4.5 640 Gb/s 비트 오차율 커브^[15]

제3절 펄스초 광펄스 특성평가

입력 펄스의 전기장 성분을 광학적으로 미분하면, 펄스 위상의 미분항을 얻을 수 있다. 이것은 입력 펄스의 진폭과 그 미분된 진폭의 조합으로 이뤄진다. 따라서 입력 펄스의 진폭과 미분된 진폭을 측정하면 초기 펄스의 시간상 미분된 위상을 얻을 수 있다. 이것을 수치적으로 적분하여 최종적인 입력 펄스의 위상 정보를 구할 수 있다. 그림 4.6은 펄스초 광펄스 특성 평가 시스템을 나타낸다. 기존에 제안된 장주기 광섬유 격자를 이용하여 광펄스 특성 평가 시스템을 구성하게 된다. 광미분의 기능이 있는 장주기 광섬유 격자 기반 광미분기로 입력펄스의 미분 펄스를 얻게 된다. 광커플러를 이용하여 미분된 펄스와 입력펄스가 간섭을 일으키도록 구성하고, 이 간섭무늬를 측정하여 푸리에변환을 통해 시간영역에서 보면 그림 4.7과 같은 미분된 펄스와 위상정보를 얻을 수 있다. 또한 시스템에 샘플 광섬유를 연결하면, 샘플 광섬유의 분산특성이 포함된 미분 펄스와 위상을 측정할 수 있다. 이렇게 광미분기는 광펄스의 위상 측정과 광소자의 분산 특성을 얻을 수 있는 다기능 측정 기술에 적용이 가능하다.

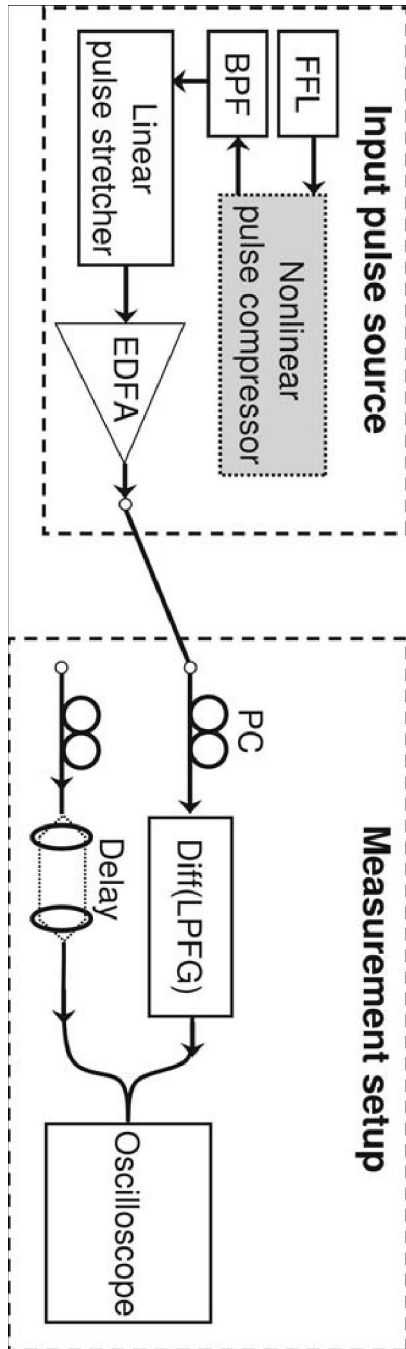


그림 4.6 펨토초 광펄스 특성 평가^[16]

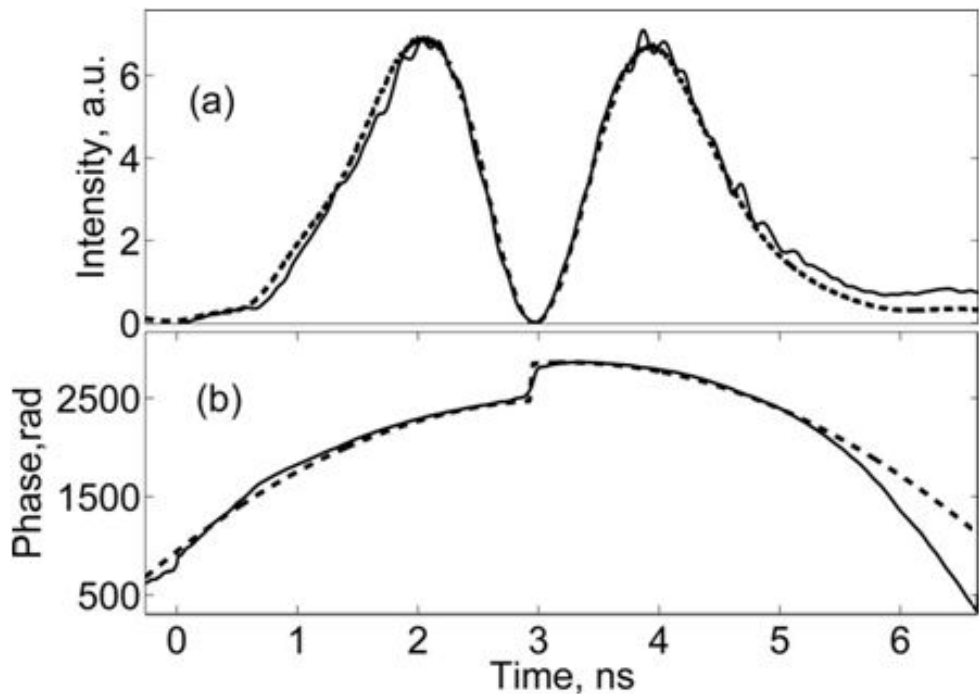


그림 4.7 광미분의 결과(a) 및 펄스 위상(b)¹⁶⁾

제5장 실험 및 시뮬레이션

제1절 비대칭형 광커플러의 광미분 원리

광커플러는 광신호를 분기하거나 결합하는 기초적인 광학 부품이다. 본 논문에서 사용된 비대칭형 광커플러가 광미분 특성을 가지는 광학 선형필로서 역할을 한다. 비대칭형 광커플러는 일반 광커플러와 달리 그림 5.1에서처럼 두 광섬유가 서로 다른 코어 크기와 굴절률 분포를 가지게 된다. 서로 다른 광섬유를 가지고 제작되기 때문에 각 각의 광섬유의 전파상수(propagation constant)가 그림 5.2처럼 다른 형태를 나타내게 되며, 두 광섬유의 전파상수가 겹쳐지는 부분에서 광커플러의 공진과장(커플링과장)이 결정된다. 커플러 제작시 사용하는 광섬유의 종류에 따라 전파상수가 다른 형태를 가지게 되고 두 광섬유의 공진과장도 바뀌게 된다. 즉, 광섬유의 종류에 따라 공진 과장을 선택할 수 있어 본 논문에 사용한 광커플러를 비대칭형 광커플러로 정의하였다. 비대칭형 광커플러의 또 다른 특징은 서로 다른 광섬유로 제작되기 때문에 도파로 1과 도파로 2에서 다른 형태의 전달함수식을 가지게 되고, 각 전달함수는 다음과 같이 표현된다.

$$H_1 \approx \left[\cos(CL) - i \frac{\Delta\beta}{C} \sin(CL) \right] \exp(-i\beta_1 L)$$
$$H_2 \approx -i \left\{ \sin(CL) + \frac{\Delta\beta^2}{2C^2} [CL \cos(CL) - \sin(CL)] \right\} \exp(-i\beta_2 L) \quad (5.1)$$

여기서 C 는 커플링 계수(coupling coefficient)이고 L 은 커플링 영역의 길이를 나타낸다. β_1 과 β_2 는 두 광섬유의 전파상수이고, $\Delta\beta$ 는 두 광섬유의 전파상수의 차이($\beta_1 - \beta_2$)를 나타낸다. 비대칭형 광커플러는 그림 5.3처럼 제작 조건에 따라 1차 광미분기와 2차 광미분기로 사용할 수 있다. CL 값이 $\pi/2$ 의 정수배가 되면 도파로 1에서 1차미분이 가능한 전달함수를 가지게 되고 π 의 정수배가 되면 도파로 2에서 2차미분이 가능한 전달함수를 가지게 된다. CL 의 조건이 $\pi/2$ 의 정수배 일 때 식 5.1은 다음과 같이 표현된다.

$$H_1 = -i \frac{\Delta\beta}{C} \propto -i(\omega - \omega_0)$$

$$H_2 = 1 - \frac{\Delta\beta}{2C^2} \quad (5.2)$$

이 때, 도파로 1의 전달함수가 1차 함수 형태로 나타나게 되어 1차 미분의 기능을 가지게 되며, 입력펄스와 곱으로 1차 미분된 펄스를 얻게 된다. 또한, CL의 조건이 π 의 정수배 일 때 식 5.1은 다음과 같이 표현된다.

$$H_1 = 1$$

$$H_2 = -\frac{L}{2C} \Delta\beta^2 \propto -(\omega - \omega_0)^2 \quad (5.3)$$

이 때, 도파로 2의 전달함수가 2차 함수 형태를 가지게 되어 1차 미분에서와 마찬가지로 2차 미분의 기능을 할 수 있다. 이처럼 CL값에 따라 비대칭형 광커플러를 이용한 광미분기는 1차 광미분기와 2차 광미분기로 사용할 수 있다. 비대칭형 광커플러를 제작하면 CL값이 π 의 정수배와 $\pi/2$ 의 정수배 조건 중 한 조건으로만 결정해야 하기 때문에 1차 미분과 2차 미분 중 한 가지 미분만 가능한 광미분기를 제작하게 된다. 즉, 단일 비대칭형 광커플러로 1차 미분과 2차 미분을 진행할 때 CL값의 조건이 다르기 때문에 1, 2차 동시에 진행할 수 없다.

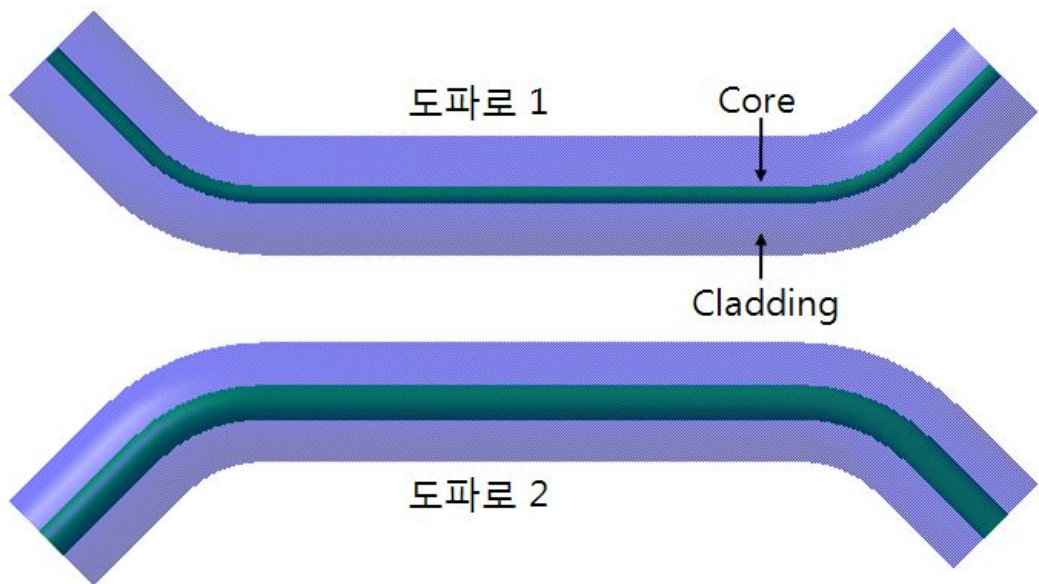


그림 5.1 비대칭형 광케플러의 단면도

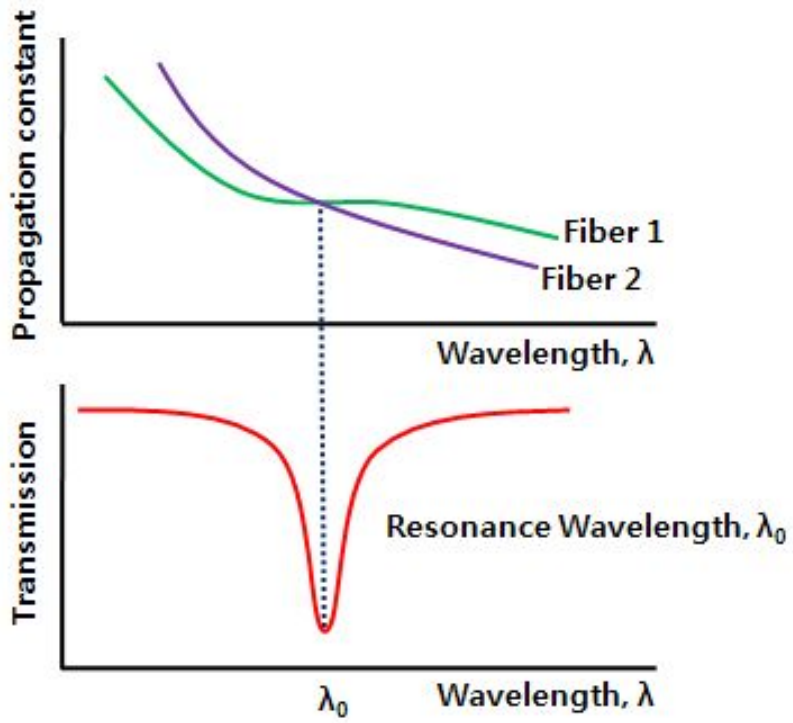


그림 5.2 두 광섬유의 전파상수 특성

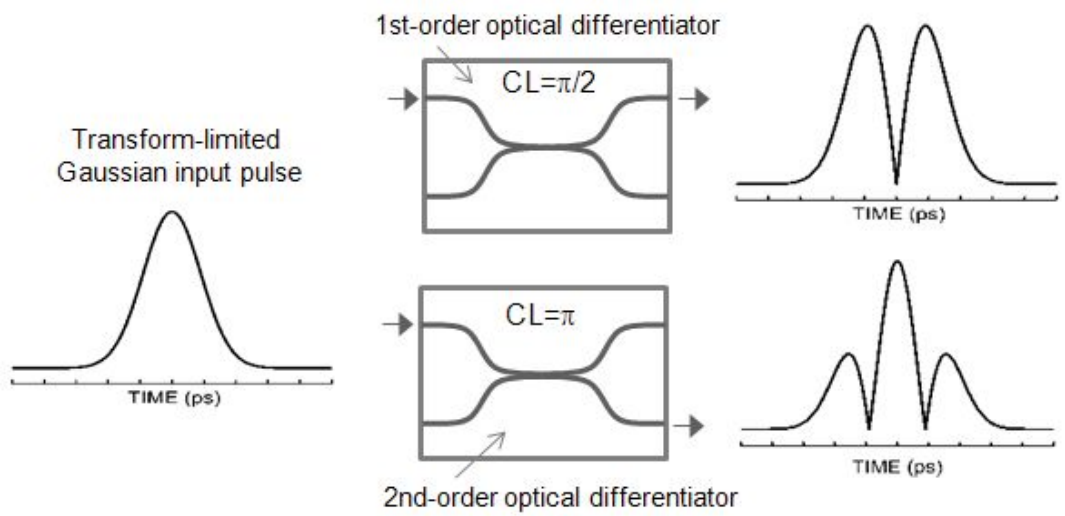


그림 5.3 비대칭형 광커플러의 광미분 개요도

제2절 비대칭형 광커플러를 이용한 광미분기

본 연구에서 제안한 비대칭형 광커플러는 광학 선형필터로서 역할을 한다. 이 광커플러는 서로 다른 광섬유를 가지고 제작되며 두 광섬유의 코어간 간격과 광섬유의 코어 사이즈, 굴절률 등 광섬유 특성에 따라 커플링 효과가 바뀌게 된다. 이론에서 설명한 비대칭형 광커플러의 전달함수 식을 이용하여 전달함수를 시뮬레이션하고, 입력펄스는 임의의 가우시안 펄스와 슈퍼-가우시안 펄스를 사용하였다. 입력펄스의 FWHM 지속시간은 3 ps, 커플링 기울기는 0.02 um^{-2} , 커플링 영역의 길이는 8 mm로 시뮬레이션을 진행하였다. 비대칭형 광커플러의 전달함수는 CL의 조건에 따라 1550 nm에서 1차 미분 전달함수와 2차 미분 전달함수 형태를 가지게 되며 입력펄스의 중심과장에 전달함수를 위치시켜 광미분을 하였다.

표 5.1과 같은 조건을 이용하여 시뮬레이션을 통해 그림 5.4와 같은 1차 미분 전달함수와 2차 미분 전달함수를 구하였다. 1차 미분 전달함수는 1차 함수 형태를 가지게 되며 선형적인 부분에서 미분의 기능을 가지게 된다. 또한 2차 미분 전달함수는 2차 함수 형태를 가지게 된다. 계산된 1차, 2차 미분 전달함수는 입력펄스와의 곱으로 각각의 1차, 2차 광미분을 진행하였다. 입력펄스와 1차 미분 전달함수의 전기장의 곱을 시간영역에서 보면 미분된 결과를 확인할 수 있다.

그림 5.5는 입력펄스로 점선으로 그려진 가우시안 펄스를 사용하여 실선으로 그려진 1차미분의 결과를 나타낸 것이다. 미분 오차는 입력펄스의 수학적 미분 결과와 광미분기의 미분 결과 중 오차가 가장 많이 일어난 부분을 나타낸다. 가우시안 입력펄스의 1차 미분결과와 원으로 그려진 수학적 미분결과는 0.55%의 오차를 가지고 일치하는 것을 확인하였다. 같은 방법으로 점선으로 그려진 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 1차 광미분을 진행하였다. 그림 5.6과 같이 슈퍼-가우시안 펄스에 대한 실선으로 그려진 1차 광미분의 결과를 확인하였으며, 입력펄스에 대한 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 1.98%의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 비대칭형 광커플러의 전달함수는 커플링계수(C)와 커플링 영역의 길이(L)의 곱이 π 의 정수배 일 때 2차 미분 전달함수의 형태를 가지게 되며 입력펄스와의 곱을 통해 2차 광미분을 진행하였다.

그림 5.7는 점선으로 그려진 가우시안 펄스의 2차 광미분을 진행하여 실선으로 그려진 미분된 결과를 나타낸 것이며, 입력 펄스에 대한 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 1.17%의 오차를 가지고 일치하는 것을 확인하였다. 그림 5.8는 같은 방법으로 점선

으로 그려진 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 2차 광미분을 진행하여 실선으로 그려진 미분된 결과를 나타낸 것이며, 입력펄스에 대한 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 2.67%의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 가우시안 펄스와 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 1차, 2차 광미분을 진행하여 수학적인 미분과 거의 일치하는 것을 확인하였다. 비대칭형 광커플러의 미분오차는 표 5.2와 같은 분포를 가지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

미분기 전달함수에서 미분이 가능한 부분을 대역폭이라고 정의를 하였다. 이 대역폭은 비대칭형 광커플러 커플링 길이(L)와 커플링 기울기(η)에 따라 대역폭 변화를 가지게 된다. 수학적인 대역폭의 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\nu_{FWHM} = \frac{cp}{L\eta\lambda_0^2} \quad (5.4)$$

여기서 c는 진공중의 빛속도, p는 커브 피팅 파라미터, L은 커플링 영역의 길이, η 은 커플링 기울기 차이, λ 는 중심 파장을 나타낸다. 그림 5.9은 커플링 기울기가 0.02 um^{-2} 일 때, 커플링 영역의 길이 변화에 따른 대역폭의 변화를 나타낸다. 실선으로 나타낸 부분은 식 5.4로 구한 이론적인 커플링 영역의 길이 변화에 따른 1차, 2차 전달함수의 대역폭이며, 시뮬레이션을 통해 구한 1차, 2차 전달함수의 대역폭과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 커플링 영역의 길이가 증가할수록 대역폭은 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 5.10은 커플링 영역의 길이가 8 mm일 때, 커플링 기울기의 변화에 따른 대역폭의 변화이다. 실선으로 나타낸 부분은 수식으로 구한 커플링 기울기의 변화에 따른 1차, 2차 전달함수의 대역폭이며, 시뮬레이션을 통해 구한 1차, 2차 전달함수의 대역폭과 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 커플링 기울기가 증가할수록 대역폭은 감소하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 그림 5.9와 그림 5.10을 통해 커플링 영역의 길이와 커플링 기울기의 변화를 주어 비대칭형 광커플러의 대역폭을 조절할 수 있는 것을 알 수 있다.

에너지 효율은 입력 펄스 대비 미분된 출력 펄스의 에너지 비로 정의되며, 다음과 같이 표현된다.

$$Efficiency(\%) = \frac{E_{Diff}}{E_{input}} \times 100\% \quad (5.5)$$

여기서 E_{input} 은 입력펄스의 에너지를 나타내며, E_{Diff} 는 미분된 펄스의 에너지를 나타낸다. 그림 5.11은 1차 광미분시 비대칭형 광커플러의 에너지 효율을 나타낸다. 대역폭

이 증가함에 따라 미분이 진행되는 과정에서 입력펄스가 필터 아웃되는 부분이 증가하기 때문에 에너지 효율은 감소하게 된다. 그림 5.12는 2차 광미분시 비대칭형 광커플러의 에너지 효율이며, 대역폭이 증가함에 따라 미분이 진행되는 과정에서 필터 아웃되는 부분이 증가하기 때문에 에너지 효율은 감소하게 된다. 또한 2차 광미분이 1차 광미분보다 입력펄스가 전달함수에서 필터 아웃되는 부분이 많기 때문에 에너지효율이 떨어지게 된다. 그림 5.11과 그림 5.12에서 볼 수 있듯이 광미분기에서 에너지 감소가 많이 일어나기 때문에 미분기의 성능을 결정하는 중요한 요소로 작용한다. 시뮬레이션을 통해 비대칭형 광커플러의 광미분 가능성을 확인하였고, 1차 광미분이 가능한 광커플러를 제작하여 입력펄스를 광미분해 보았다.

제작에 사용한 광섬유는 Corning사의 SMF-28과 OFS사의 OFS980-20으로 제작하였다. SMF-28에서 코어와 클래딩의 굴절률 차이는 0.47%이며 OFS980-20은 0.96%이다. 코어 반경은 각각 4.1 μm 와 1.8 μm 이다. 제작시 ~ 10 mm의 커플링 영역의 길이를 가지도록 그림 5.13처럼 광커플러를 제작하였으며, 이 값들은 표 5.3에 정리 하였다. 제작된 비대칭형 광커플러의 전달함수는 그림 5.14에서 볼 수 있듯이 1차 함수형태를 가지고 있어 1차 광미분기로 사용할 수 있다. 전달함수의 중심 파장에서 위상을 측정해본 결과 180도 만큼 위상이 변화됨을 알 수 있다. 전달함수와 위상을 측정해본 결과 제작된 비대칭형 광커플러는 1차 광미분의 기능을 가진 전달함수 형태로 되어 광미분기로 사용할 수 있다. 제작된 광커플의 광미분 실험에서 입력펄스로는 그림 5.15 (a)에서처럼 가우시안 형태의 펄스를 사용하였다. 입력 펄스에 대한 광미분이 그림 5.15 (b)과 같이 1차 미분 형태로 나타났다. 광미분이 진행되는 과정에서 위상변화를 알아보기 위해 입력펄스와 1차 미분된 펄스를 간섭시켜 위상을 측정하게 된다. 그림 5.15 (c)는 두 펄스의 간섭된 펄스이다. 이 간섭신호를 푸리에 변환을 통해 시간영역에서 보면 위상정보를 얻을 수 있다.

펄스 레이저를 이용해 제작된 비대칭형 광커플러를 이용해 1차 광미분을 진행하여 그림 5.16와 같은 1차 미분 펄스와 위상정보를 측정하였다. 그림 5.16 (a)는 미분된 펄스의 크기이고, 그림 5.16 (b)는 미분된 펄스의 세기이다. 미분이 진행되면서 180도 만큼 위상이 변화하는 것을 알 수 있다. 비대칭형 광커플러가 광미분기로 사용할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였고, 광커플러를 제작하여 실험을 통해 광미분기로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

표 5.1 비대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건

입력 펄스	가우시안/ 슈퍼-가우시안
커플링 파장(λ)	1550 nm
FWHM 지속시간	3 ps
커플링 기울기(η)	0.02 um^{-2}
커플링 영역 길이(L)	8 mm

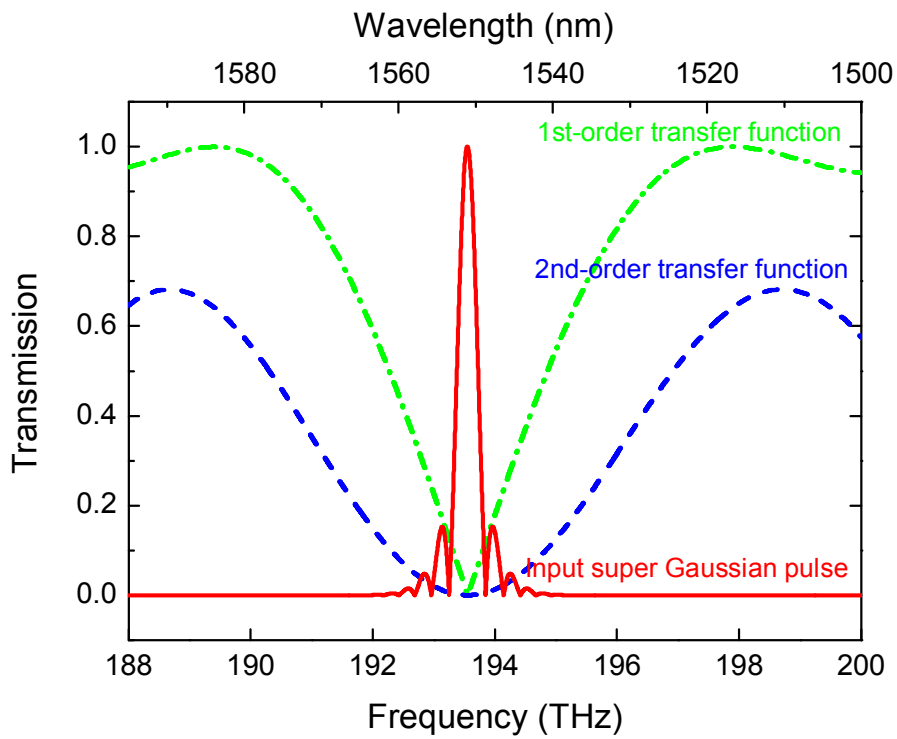


그림 5.4 비대칭형 광케플러의 전달함수

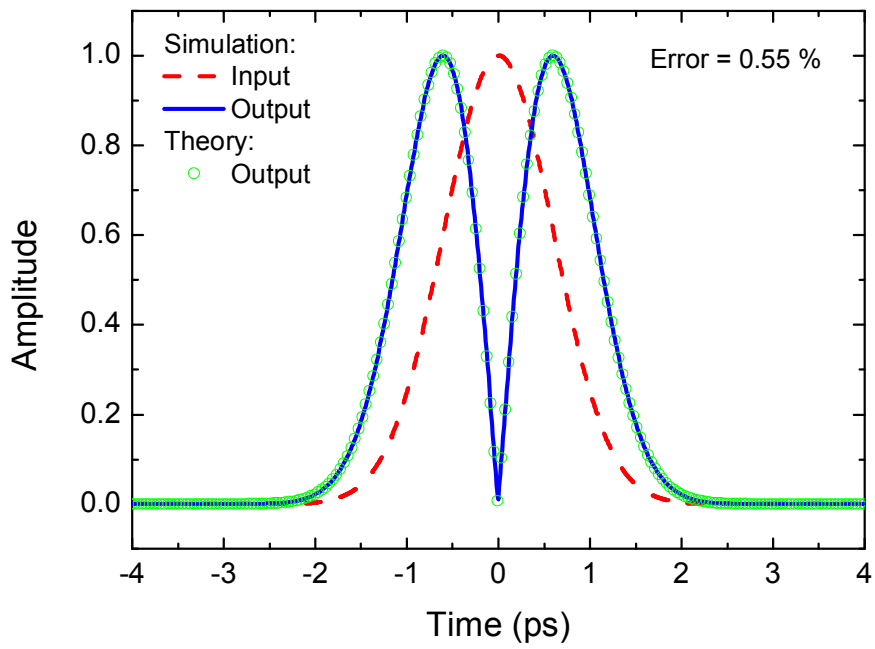


그림 5.5 가우시안 펄스의 1차 광미분

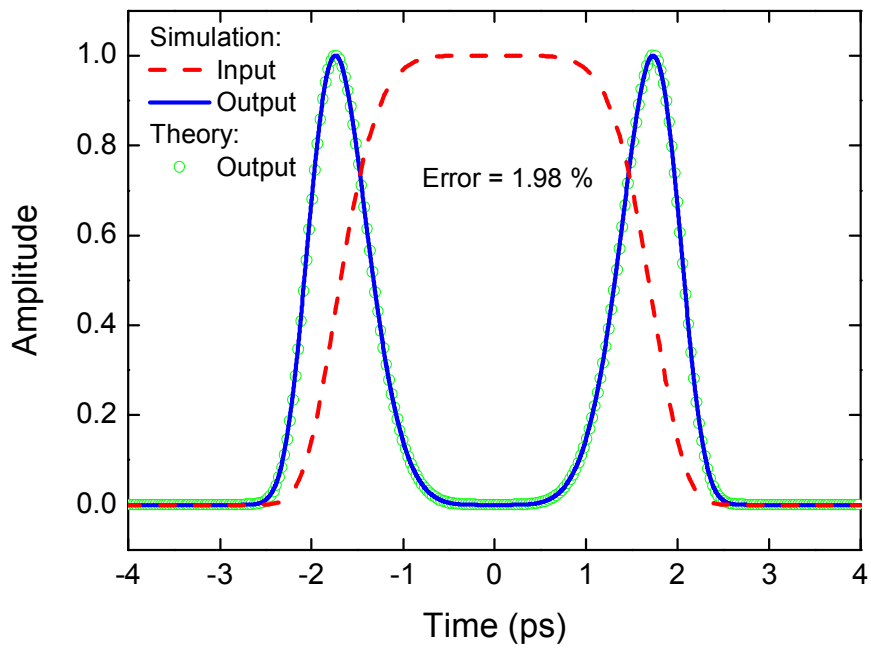


그림 5.6 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분

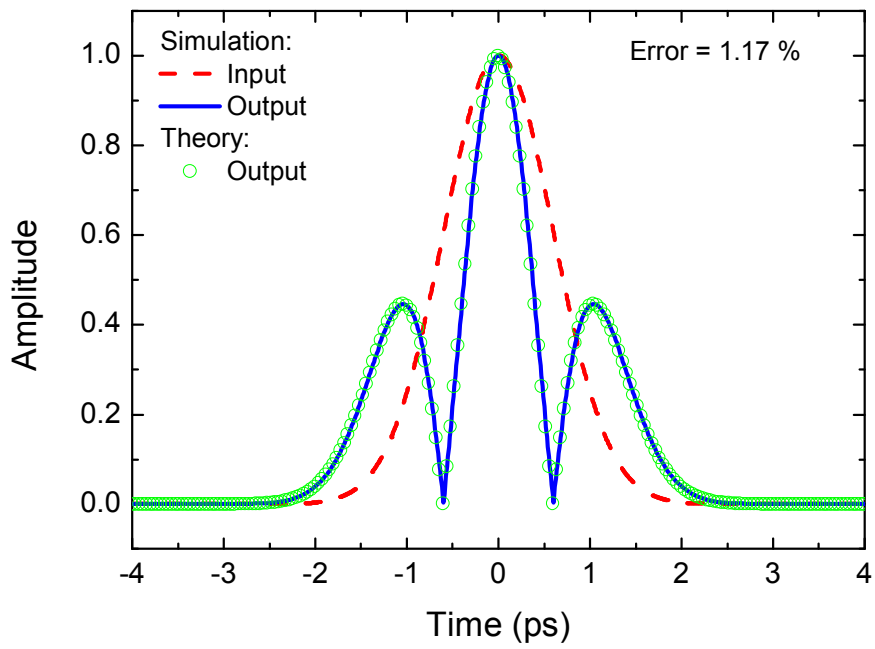


그림 5.7 가우시안 펄스의 2차 광미분

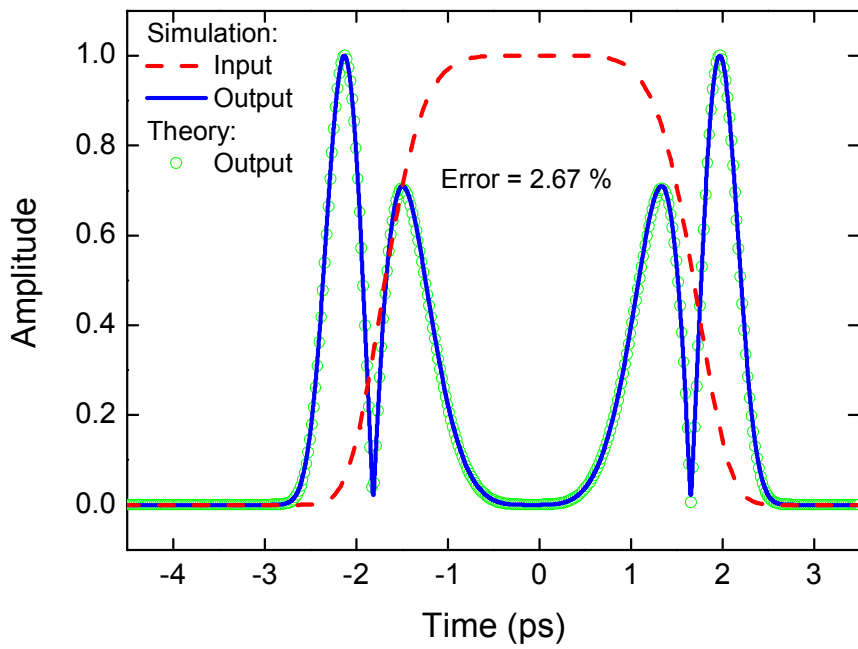


그림 5.8 슈퍼-가우시안 펄스의 2차 광미분

표 5.2 비대칭형 광커플러의 광미분 오차

입력 펄스	가우시안	슈퍼-가우시안
1차 광미분	0.55%	1.98%
2차 광미분	1.17%	2.67%

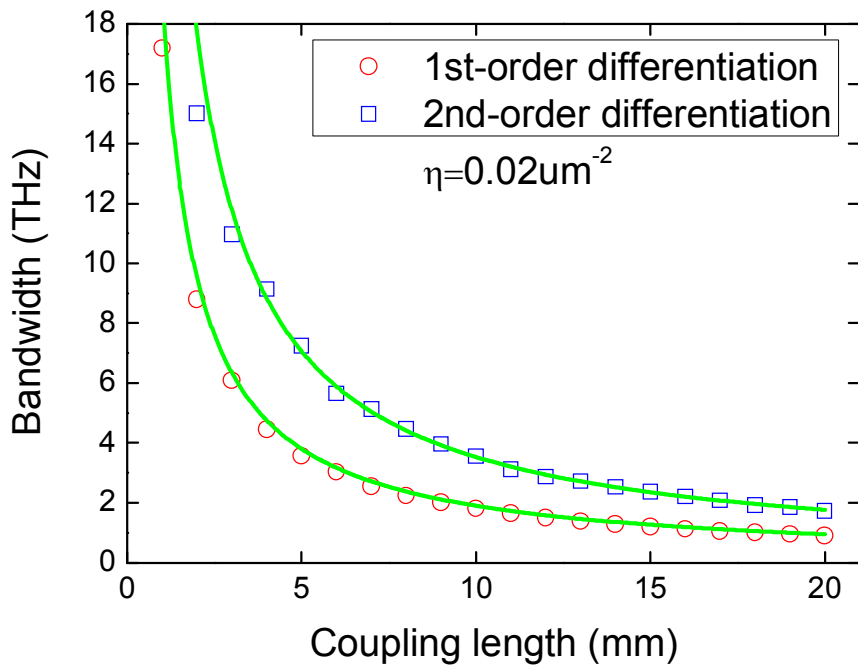


그림 5.9 커플링 길이에 대한 대역폭 변화

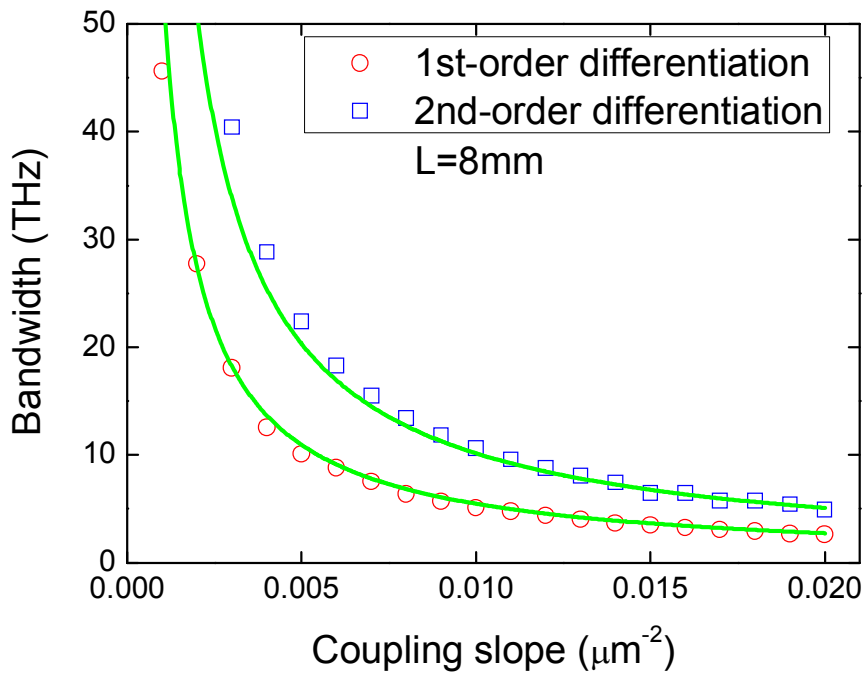


그림 5.10 커플링 기울기에 대한 대역폭 변화

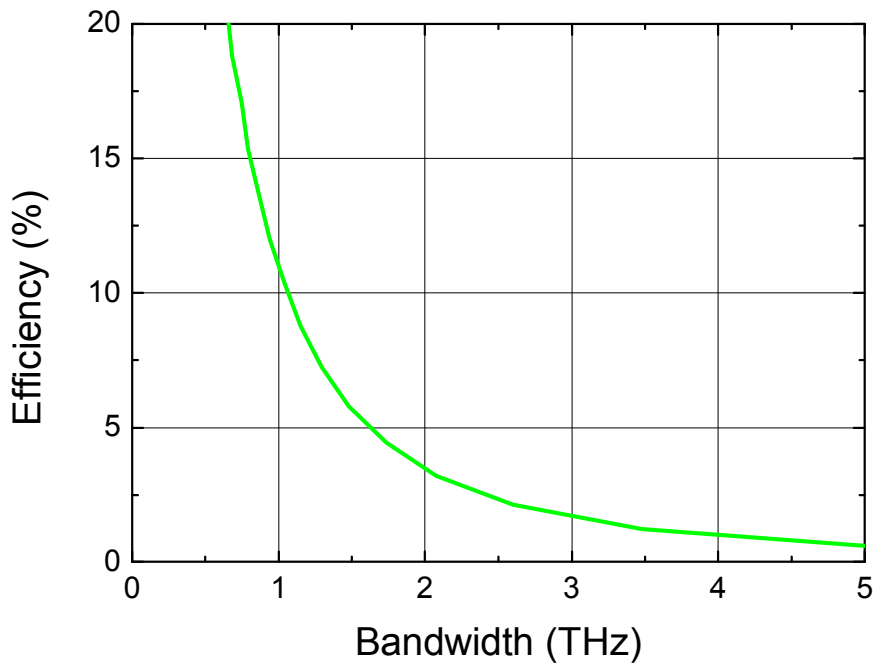


그림 5.11 대역폭 변화에 따른 1차 광미분기의 에너지 효율

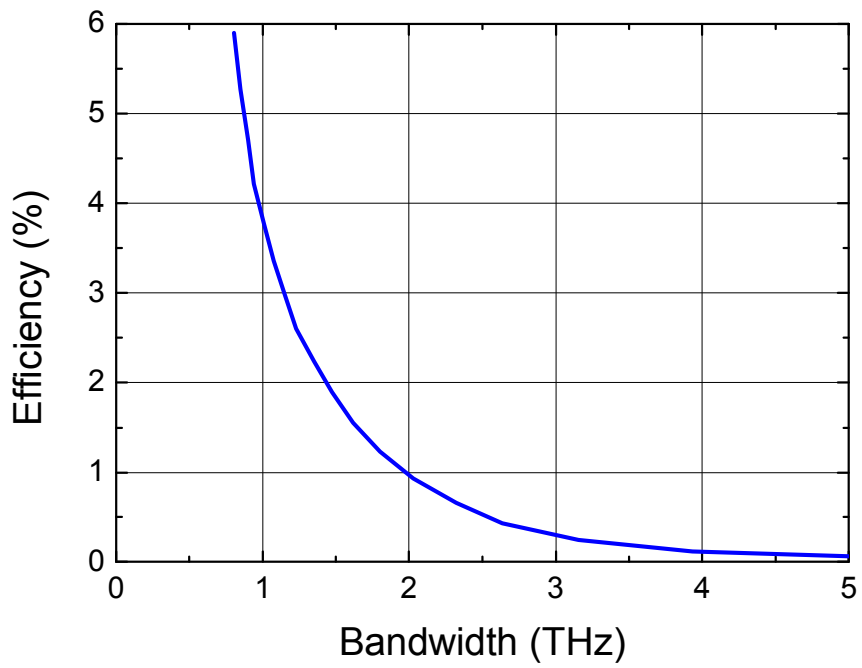


그림 5.12 대역폭 변화에 따른 2차 광미분기의 에너지 효율

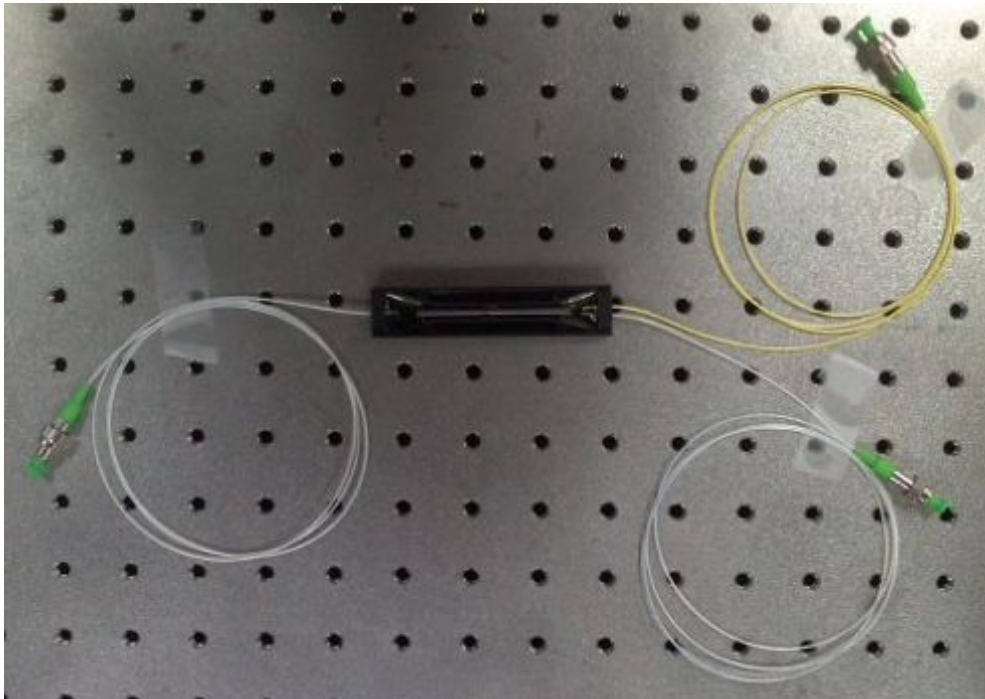


그림 5.13 제작된 비대칭형 광커플러

표 5.3 비대칭형 광커플러 제작 조건

	도파로 1	도파로 2
광섬유 종류	SMF-28	CL980-20
굴절률 차이	0.47%	0.96%
코어 반경	4.1 μm	1.8 μm
커플링 길이	10 mm	

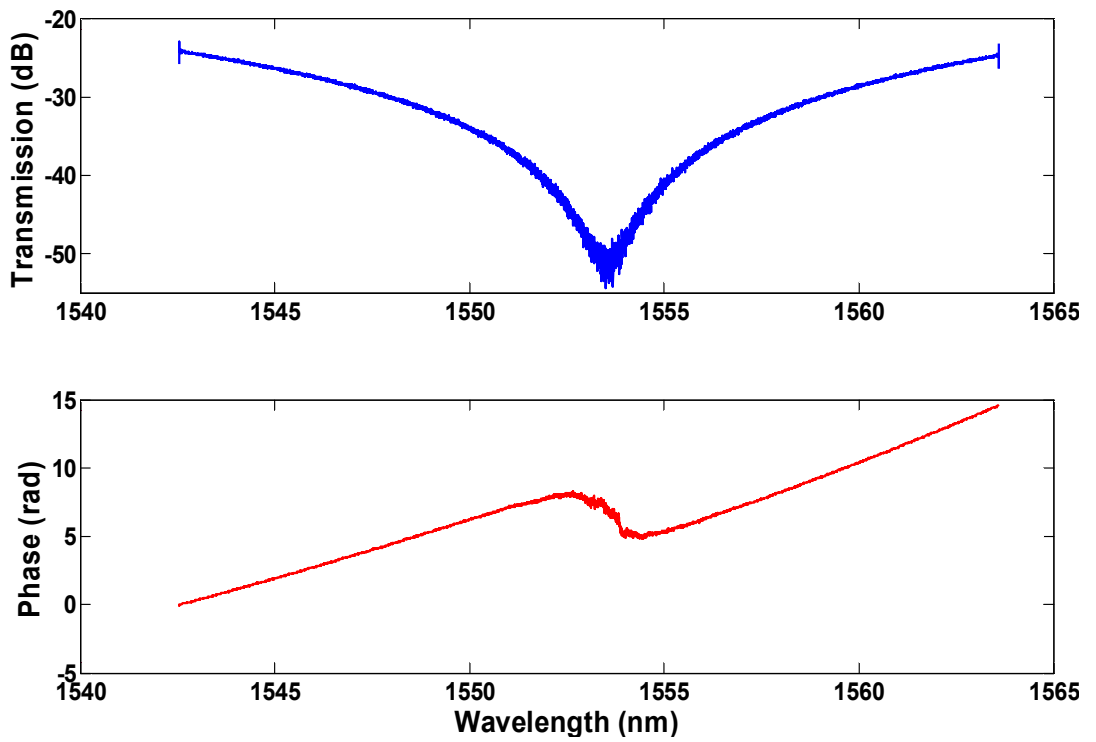


그림 5.14 비대칭형 광커플러의 전달함수 및 위상

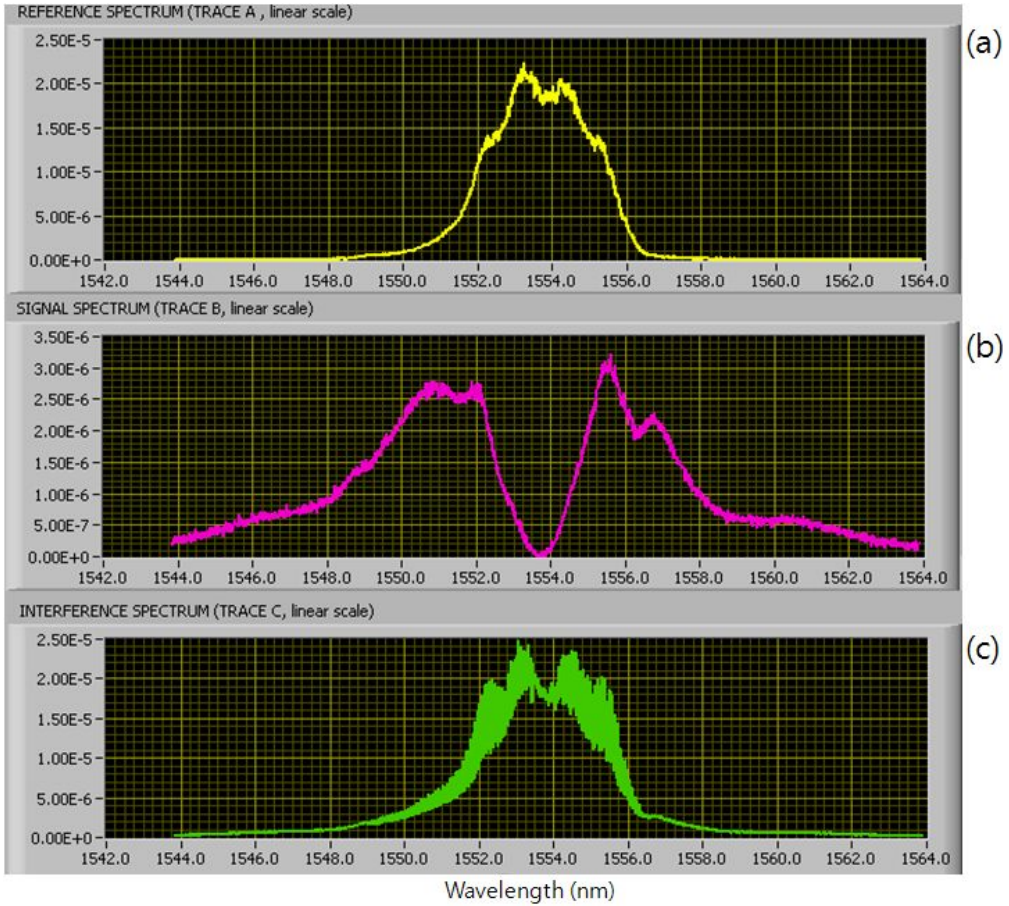


그림 5.15 비대칭형 광커플러의 입력 펄스 스펙트럼(a),
1차 광미분 펄스 스펙트럼(b), 간섭 펄스 스펙트럼(c)

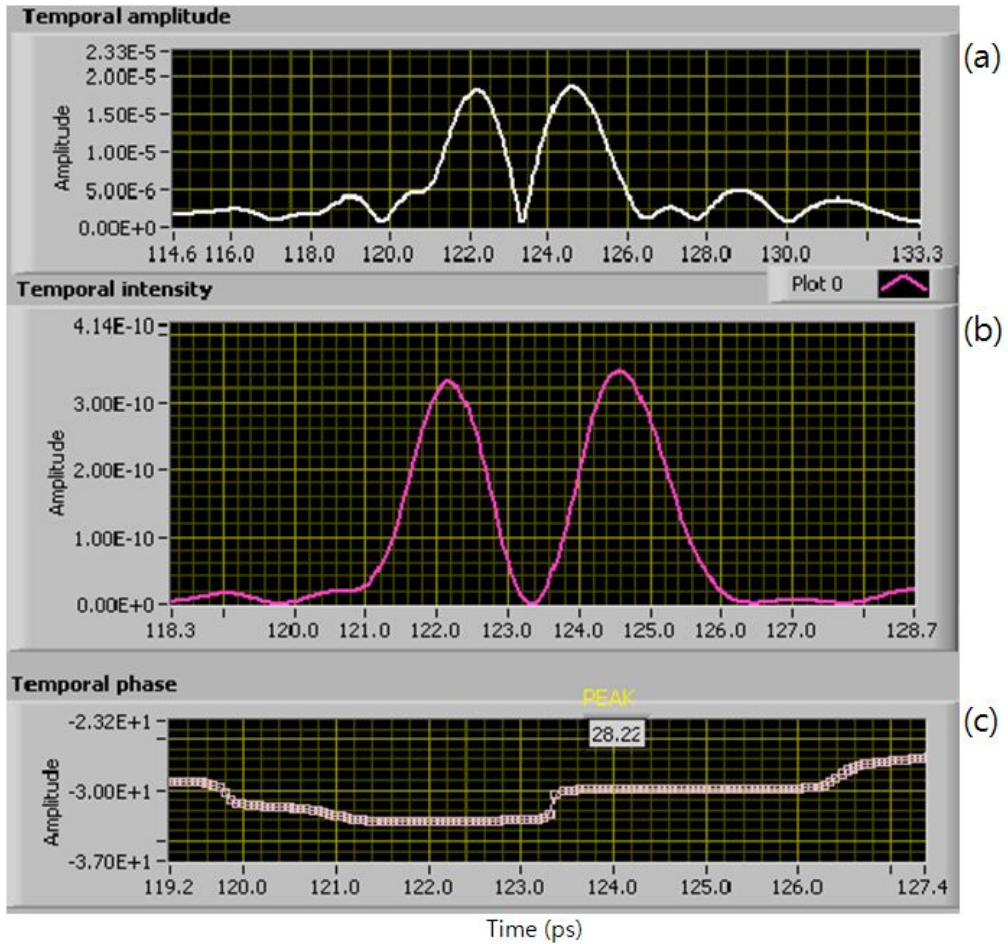


그림 5.16 비대칭형 광커플러를 이용한 1차 광미분의 크기(a),
1차 광미분의 세기(b), 위상(c)

제3절 대칭형 광커플러의 광미분 원리

앞에서 제안한 광미분기는 서로 다른 코어 크기와 굴절률 분포를 가진 두 광섬유로 제작된 비대칭형 광커플러를 이용한 것인 반면, 본 절에서 제안하는 광미분기는 기존 광통신의 핵심 부품 중 하나인 동일 광섬유로 구성된 광커플러를 광미분에 적용한 것이다. 대칭형 광커플러는 일반적인 제작방법인 용융 인장 방법으로 제작되며, 그림 5.17과 같이 동일 광섬유로 제작되기 때문에 제작이 쉽다는 장점을 가지고 있다. 하지만 도파로 1과 도파로 2가 동일한 전파상수를 가지게 되어 전달함수 또한 동일한 형태를 나타낸다. 대칭형 광커플러의 전달함수 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} H_1 &= \cos(CL) \\ H_2 &= -i \sin(CL) \propto -i(\omega - \omega_0) \end{aligned} \quad (5.6)$$

여기서 C는 커플링 계수(coupling coefficient)이고 L은 커플링 영역의 길이를 나타낸다. 이 때, 도파로 2의 전달함수는 1차 함수로 나타낼 수 있어 1차 광미분의 기능을 가지게 되며, 입력펄스와 전달함수의 곱으로 1차 미분된 펄스를 얻게 된다. 대칭형 광커플러는 동일한 1차 미분이 가능한 전달함수를 가지게 되어 그림 5.18과 같이 1차 광미분기로만 사용할 수 있다. 특정한 파장에서 광미분이 가능한 전달함수를 가지게 하기 위해서는 커플링 계수(C)와 커플링 영역의 길이(L)의 변화를 주어야 한다. 커플링 영역에서 광도파로의 구조가 길이에 따라 변하기 때문에 커플링 계수는 길이에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$C(z) = \frac{\sqrt{\sigma} U^2(z) K_0(Wd/a)}{b V^3(z) K_1^2(W)} \quad (5.7)$$

여기서 $\sigma = 1 - (n_{clad}/n_{air})^2$, n_{clad} 와 n_{air} 는 각각 클래딩과 공기의 굴절률을 나타낸다. a와 d는 코어 반경, 커플링 영역에서 두 광섬유의 간격이다. K_0 와 K_1 는 각각 베셀 0차와 1차의 K함수이며, b는 커플링 영역의 반경이다. V(z), U(z), W(z)는 각각 규격화된 주파수, 규격화된 횡 위상상수, 규격화된 횡 감쇠 상수이며 다음과 같이 표현된다.

$$V(z) = (2\pi/\lambda)a(z) \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (5.8)$$

$$V(z) = [U(z)^2 + W(z)^2]^{1/2} \quad (5.9)$$

$$\frac{UJ_1(U)}{J_0(U)} = \frac{\sqrt{V^2 - U^2} K_1(\sqrt{V^2 - U^2})}{K_0 \sqrt{V^2 - U^2}} \quad (5.10)$$

여기서 J_0 과 J_1 는 베셀 0차와 1차의 J 함수이다. 식 5.8을 이용해 대칭형 광커플러에 사용된 광섬유의 $V(z)$ 를 구한 후, 식 5.9, 식 5.10을 이용하여 $U(z)$, $W(z)$ 를 구하게 된다. 시뮬레이션에 사용한 대칭형 광커플러의 $V(z)$, $U(z)$, $W(z)$ 값은 그림 5.19와 같은 함수 형태를 가지게 된다. 여기서 중요한 점은 $V(z)$ 값이 cut-off 주파수인 2.405 이하 일 때, 대칭형 광커플러가 커플링 영역에서 단일모드로 작용하며, 2.405 이상인 영역만 존재할 경우 두 광섬유 간에 커플링이 일어나지 않아 미분이 가능한 전달함수를 가지지 못하게 된다.

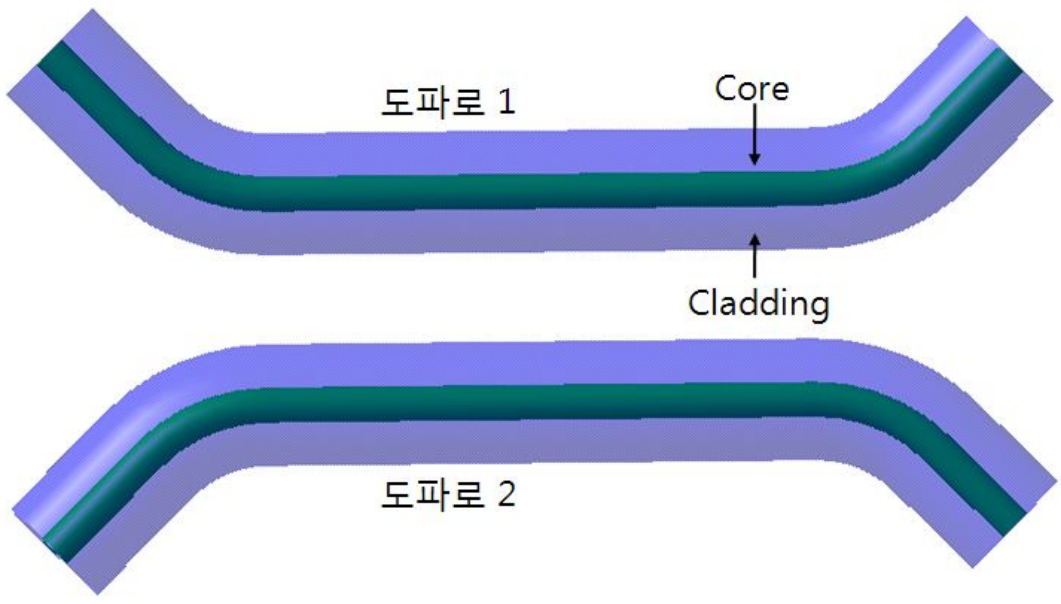


그림 5.17 대칭형 광커플러의 단면도

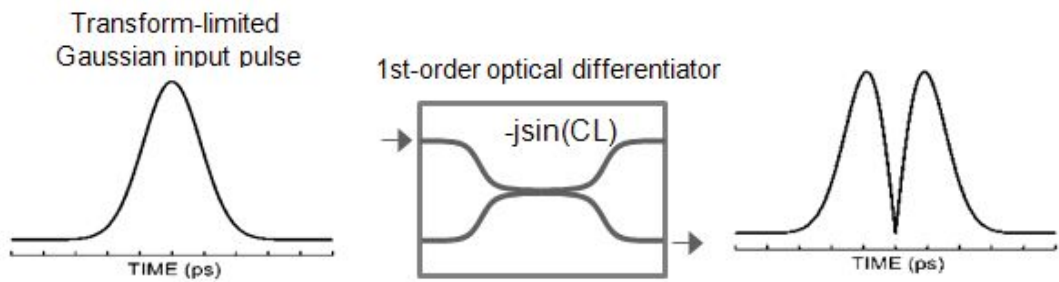


그림 5.18 대칭형 광커플러의 광미분 개요도

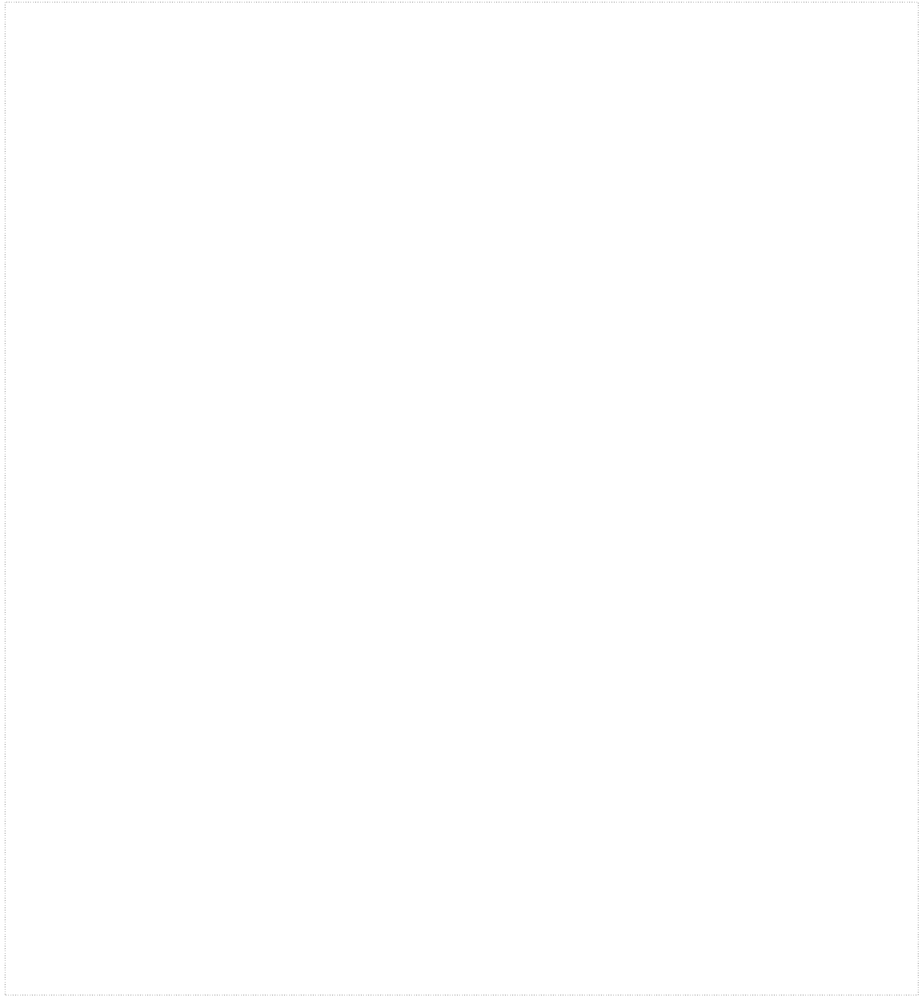


그림 5.19 대칭형 광케플러의 길이에 따른 $V(z)$, $U(z)$, $W(z)$ 함수 값

제4절 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기

1. 단일파장 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기

앞 절에서 제안한 비대칭형 광미분기는 서로 다른 굴절률과 코어 크기를 가진 두 광섬유로 구성된 광커플러를 이용한 것인 반면, 본 절에서 제안하는 대칭형 광커플러는 동일 광섬유로 구성된 광커플러를 광미분에 적용한 것이다. 커플링 계수(C)와 커플링 영역의 길이(L)의 변화를 주어 특정파장에서 커플링 되는 전달함수를 구할 수 있다. 광섬유 코어(n_1)와 클래딩(n_2)의 굴절률은 1.46410, 1.45769이며, 코어 반경(a)과 커플링 영역의 반경(b)는 4 μm , 100 μm 이다. 커플링 영역의 길이(L)과 광섬유의 간격(d)는 2 cm, 14 μm 이다. 시뮬레이션 조건은 표 5.4에 정리하였으며, 그림 5.20에 대칭형 광커플러의 단면도에 나타냈다. 주어진 시뮬레이션 조건을 이용해 그림 5.21과 같은 1차 미분 전달함수를 구하였다. 전달함수가 파장이 1550 nm인 지점에서 광커플러로 작용됨을 알 수 있고, 여기에 입력 펄스를 위치시켜 광미분을 진행하게 된다. 그림 5.22를 보면 대칭형 광커플러의 1차 미분 전달함수가 슈퍼-가우시안 펄스의 파장 중심을 통과하는 것을 알 수 있다. 슈퍼-가우시안 펄스는 시간 영역에서 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환 하였다. 시뮬레이션에서는 대칭형 광커플러에 임의의 가우시안 펄스와 슈퍼-가우시안 펄스를 이용하여 1차 광미분을 진행하였다. 그림 5.23은 입력펄스로 점선으로 그려진 가우시안 펄스를 사용하여 대칭형 광커플러의 1차 광미분을 진행한 것이다. 실선으로 그려진 미분된 결과를 보면 입력 펄스에 대해 1차 광미분을 확인할 수 있으며, 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 0.79%의 오차를 가지고 일치하는 것을 확인하였다. 광커플러의 전달함수가 음의 영역에서 양의 영역으로 이동하면서 광미분이 진행될 때 위상역시 $+\pi$ 만큼 변화한 것을 확인할 수 있다. 같은 방법으로 점선으로 그려진 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 1차 광미분을 진행하였다. 그림 5.24와 같이 실선으로 그려진 1차 광미분의 결과를 확인하였으며, 입력펄스에 대한 실선으로 그려진 수학적 미분의 결과와 1.57%의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 미분이 진행될 때 $+\pi$ 만큼 변화한 것을 확인할 수 있다. 대칭형 광커플러를 이용하여 단일 파장영역에서 광미분을 할 수 있는 전달함수를 시뮬레이션하여 임의의 가우시안 펄스와 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 1차 광미분을 하였다. 단일파장 대칭형 광커플러의 1차 미분오차는 표 5.5로 정리하였다. 시뮬레이션을 통해 단일파장 대칭형 광커플러가 광미분기로 사용할 수 있음을 확인하였다.

표 5.4 단일파장 대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건

입력 펄스	가우시안/슈퍼-가우시안
커플링 파장(λ)	1550 nm
코어 굴절률(n_1)	1.46410
클래딩 굴절률(n_2)	1.45769
코어 반경(a)	4 μm
커플링 영역 반경(b)	100 μm
커플링 영역 길이(L)	2 cm
광섬유의 간격(d)	14 μm

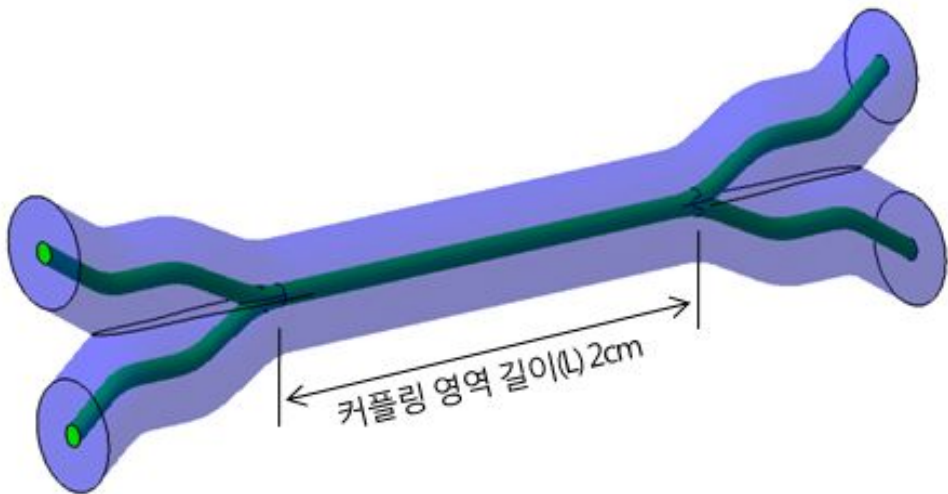
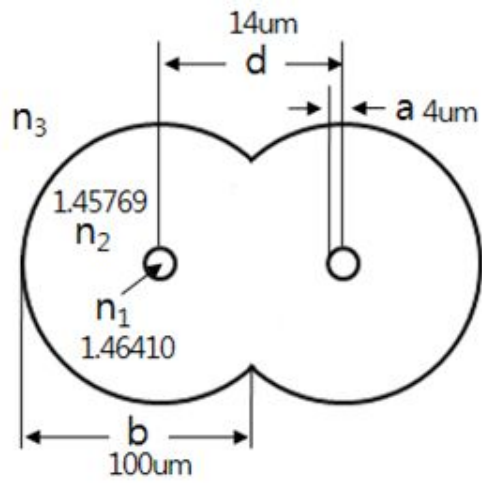


그림 5.20 대칭형 광커플러의 단면도

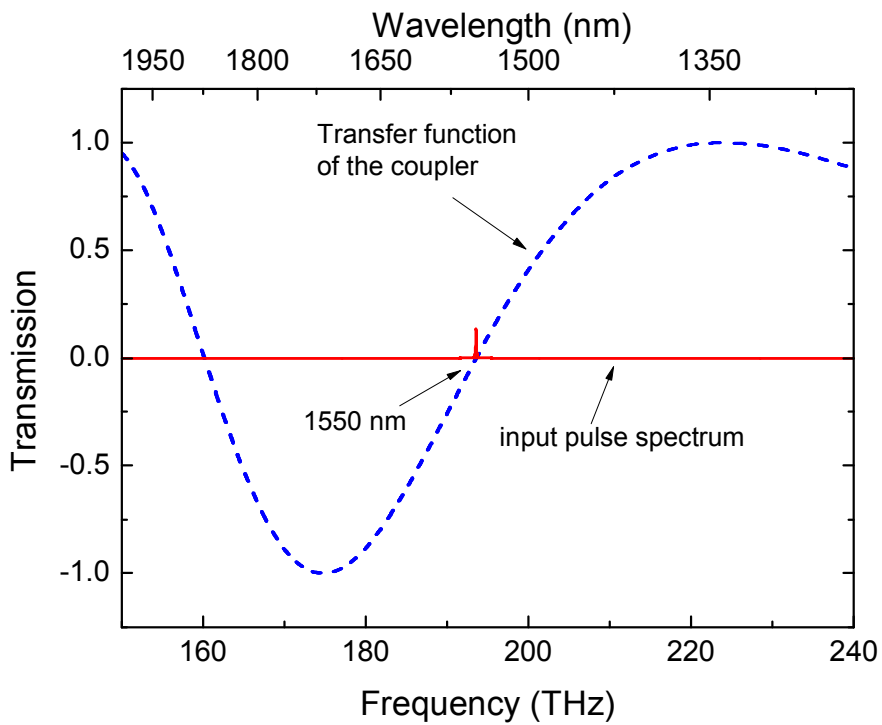


그림 5.21 단일파장 대칭형 광커플러의 전달함수

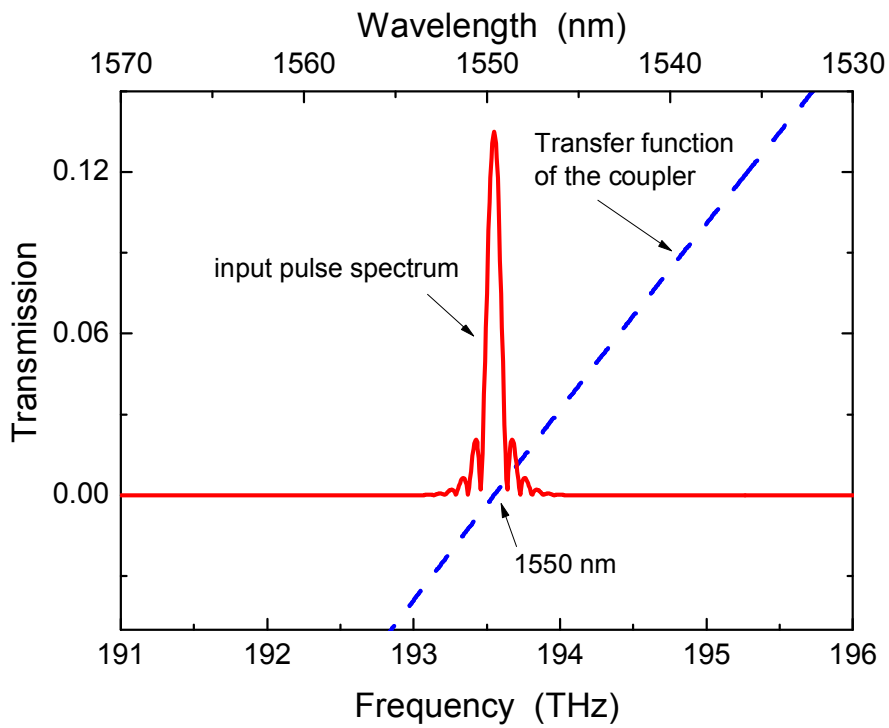


그림 5.22 확대된 단일파장 대칭형 광커플러의 전달함수

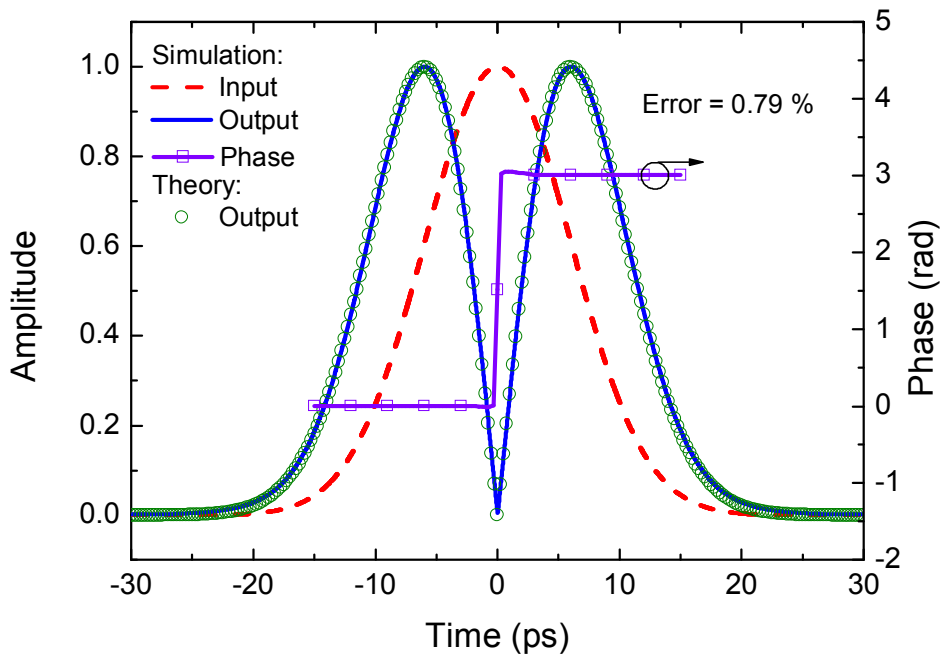


그림 5.23 가우시안 펄스의 1차 광미분

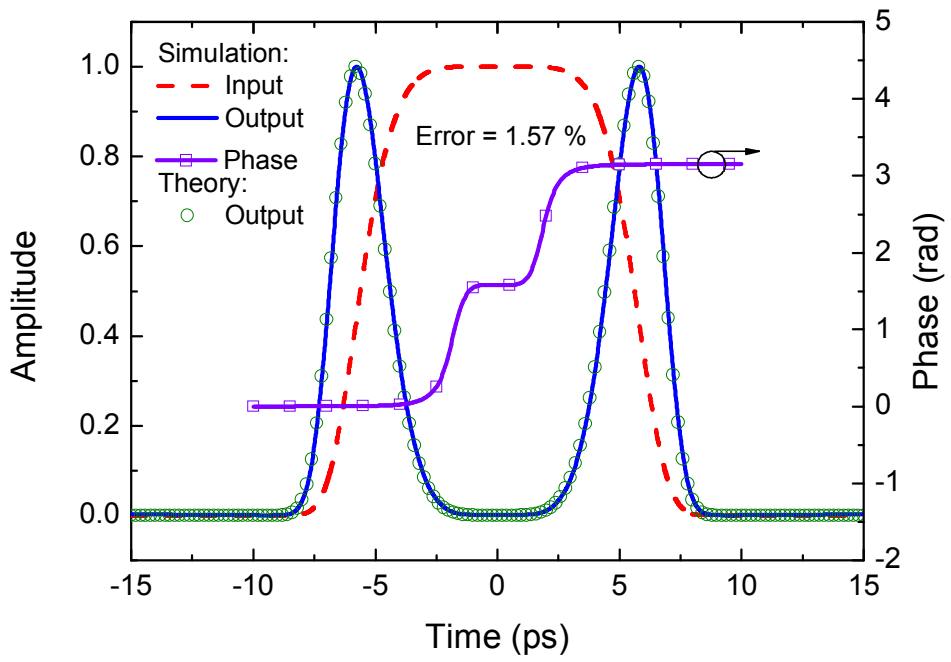


그림 5.24 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분

표 5.5 단일과장 대칭형 광커플러의 광미분 오차

입력 펄스	가우시안	슈퍼-가우시안
1차 광미분	0.79%	1.57%

2. 다중파장 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기

대칭형 광커플러의 커플링 영역의 길이(L)와 커플링 영역의 간격(d)을 조정하면 전달함수의 대역폭을 조절할 수 있다. 단일파장 대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건에서 커플링 영역의 길이(L)를 1 cm로 조정하고, 광섬유의 간격(d)를 9 μm 로 조정하여 시뮬레이션을 통해 1310 nm와 1550 nm에서 사용할 수 있는 다중파장 대칭형 광커플러를 만들 수 있다. 다중파장 대칭형 광커플러 시뮬레이션에 사용한 조건은 표 5.6에 정리하였다. 두 영역에서 다중형태로 사용할 수 있는 다중파장 대칭형 광커플러를 제작하게 되면 입력펄스를 1310 nm와 1550 nm로 사용하여 동시에 미분이 가능하다. 시뮬레이션된 다중파장 대칭형 광커플러의 전달함수를 보면 그림 5.25처럼 1310 nm와 1550 nm에서 미분이 가능함을 알 수 있다. 다중파장 대칭형 광커플러의 장점은 광통신영역에서 주로 사용하는 1310 nm와 1550 nm에서 입력 펄스의 파장에 따라 하나의 광커플러로 광미분을 진행할 수 있다는 것이다. 그림 5.26와 그림 5.27은 1550 nm와 1310 nm에서 확대된 다중파장 대칭형 광커플러의 전달함수와 슈퍼-가우시안 펄스이다. 슈퍼-가우시안 펄스는 시간 영역에서 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환하였다. 입력펄스 중심에 전달함수를 위치시켜 각 파장영역에서 광미분을 진행하였다. 그림 5.28은 입력펄스로 점선으로 그려진 가우시안 펄스를 사용하여 1550 nm에서 1차 광미분을 진행한 결과이다. 실선으로 그려진 미분된 결과를 보면 입력 펄스에 대해 1차 미분을 확인할 수 있으며, 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 5.62%의 오차를 가지고 일치하는 것을 확인하였다. 광커플러의 전달함수가 음의 영역에서 양의 영역으로 이동하면서 미분이 진행될 때 위상역시 $+\pi$ 만큼 변화한 것을 확인할 수 있다. 같은 방법으로 1550 nm에서 점선으로 그려진 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 1차 광미분을 진행하였다. 그림 5.29와 같이 슈퍼-가우시안 펄스에 대한 실선으로 그려진 1차 광미분의 결과를 확인하였으며, 입력펄스에 대한 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 1.55%의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 미분이 진행될 때 $+\pi$ 만큼 변화한 것을 확인할 수 있다. 그림 5.30은 입력펄스로 점선으로 그려진 가우시안 펄스를 사용하여 1310 nm에서 1차 미분결과이다. 실선으로 그려진 미분된 결과를 보면 입력 펄스에 대해 1차 미분을 확인할 수 있으며, 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 5.17%의 오차를 가지고 일치하는 것을 확인하였다. 1310 nm에서의 전달함수는 음의 영역에서 양의 영역으로 이동하면서 $-\pi$ 만큼의 위상변화가 일어난다. 같은 방법으로 1310 nm에서 점선으로 그려진 슈퍼-가우시안 펄스에 대해 1차

광미분을 진행하였다. 그림 5.31와 같이 슈퍼-가우시안 펄스에 대한 실선으로 그려진 1차 광미분의 결과를 확인하였으며, 입력펄스에 대한 원으로 그려진 수학적 미분의 결과와 1.56%의 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 또한 미분이 진행될 때 $-\pi$ 만큼 변화한 것을 확인할 수 있다. 다중파장 대칭형 광커플러의 미분오차는 표 5.7에 정리하였다. 1310 nm와 1550 nm의 입력펄스에 대해 다중파장 대칭형 광커플러가 광미분기로 사용할 수 있음을 확인하였다.

표 5.6 다중파장 대칭형 광커플러의 시뮬레이션 조건

커플링 파장(λ)	1550 nm
코어 굴절률(n_1)	1.46410
클래딩 굴절률(n_2)	1.45769
코어 반경(a)	4 μm
커플링 영역 반경(b)	100 μm
커플링 영역 길이(L)	1 cm
광섬유의 간격(d)	9 μm

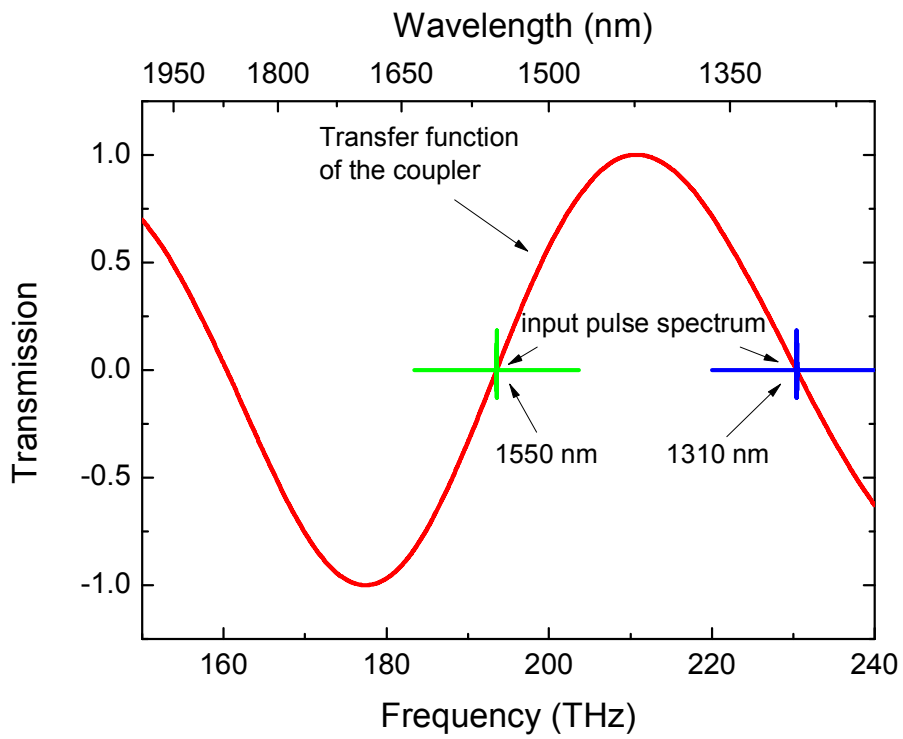


그림 5.25 다중파장 대칭형 광커플러의 전달함수

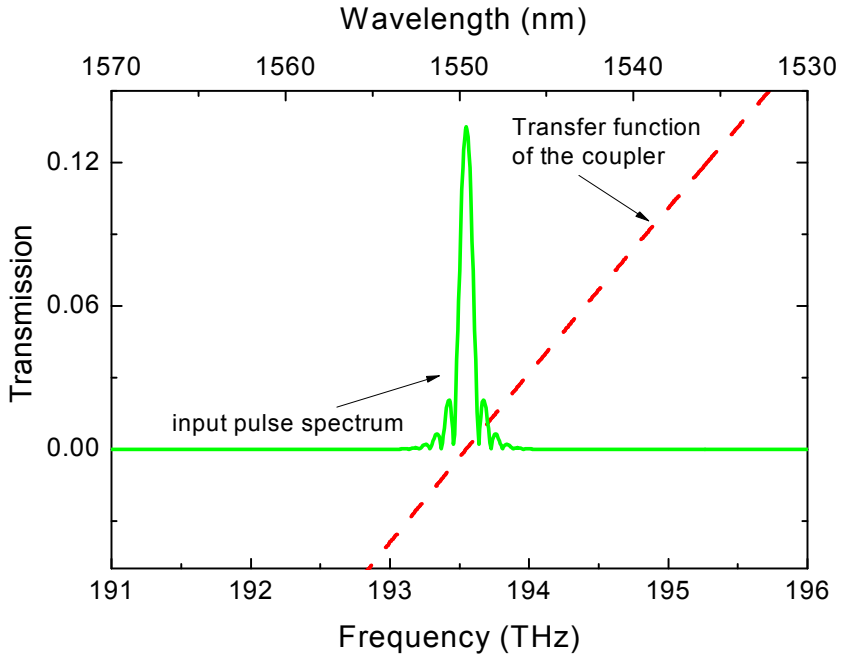


그림 5.26 확대된 다중파장 대칭형 광커플러의 전달함수 (1550nm)

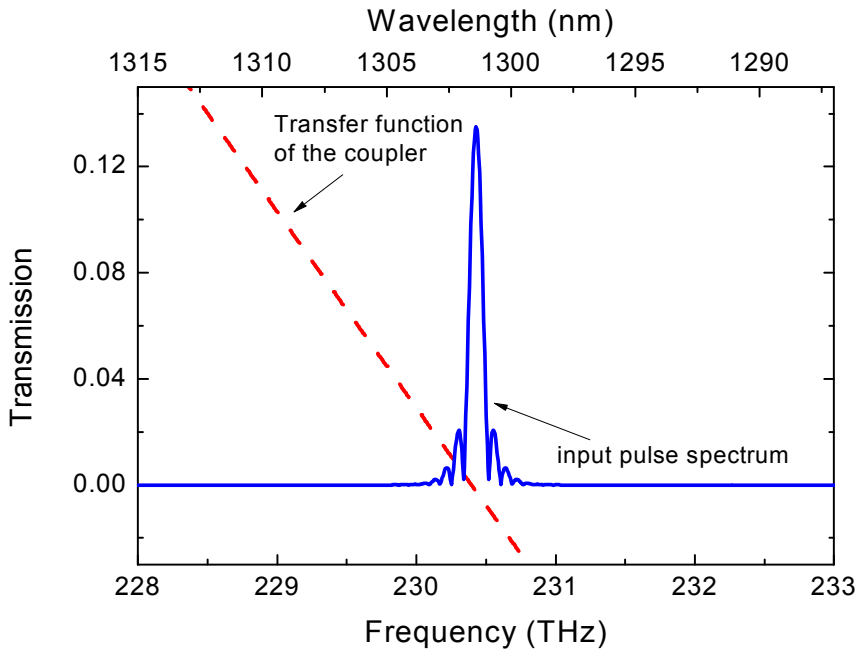


그림 5.27 확대된 다중파장 대칭형 광커플러의 전달함수 (1310nm)

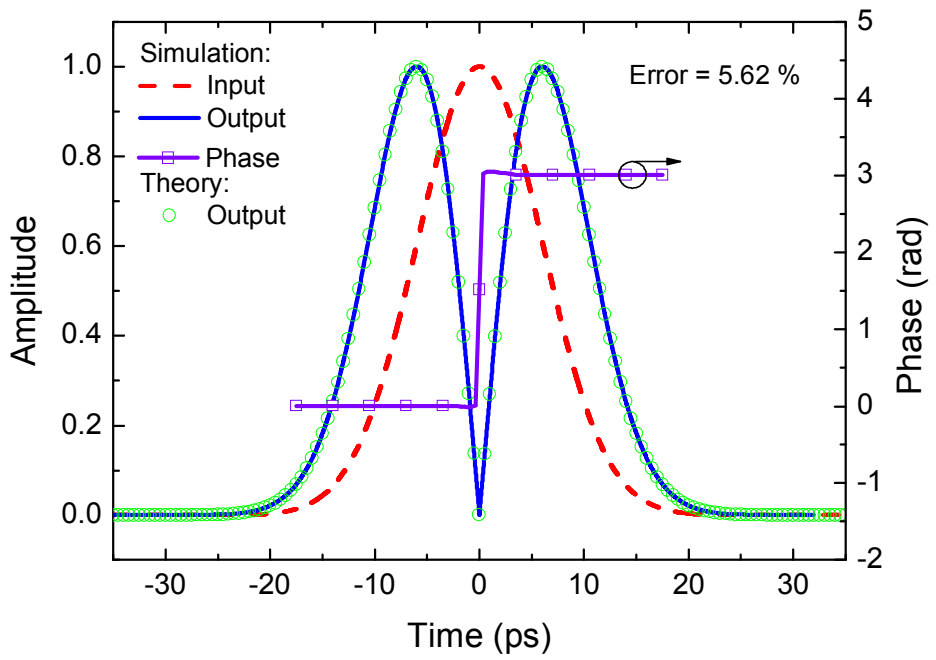


그림 5.28 가우시안 펄스의 1차 광미분 (1550 nm)

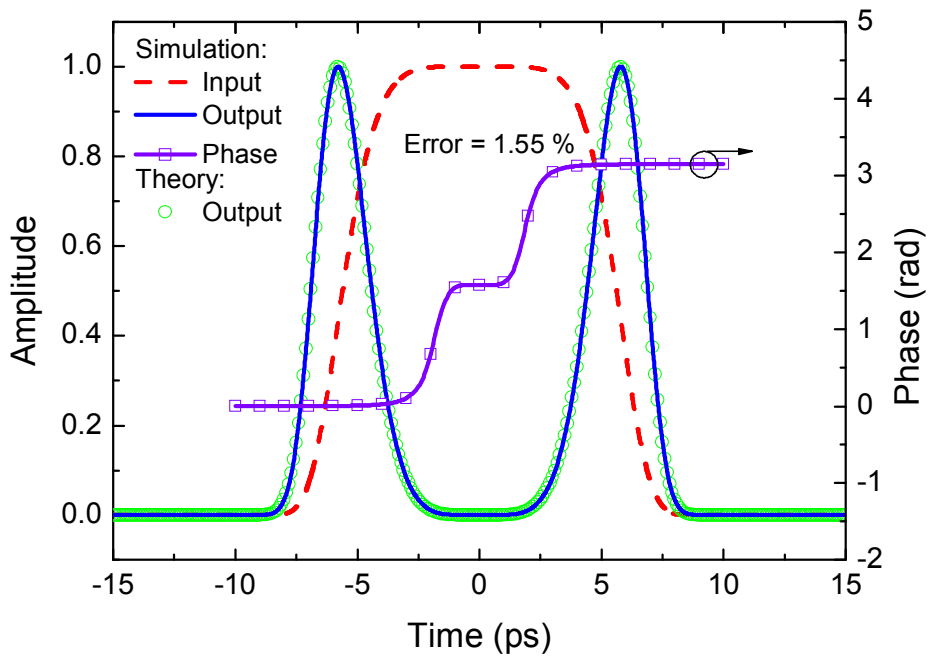


그림 5.29 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분 (1550 nm)

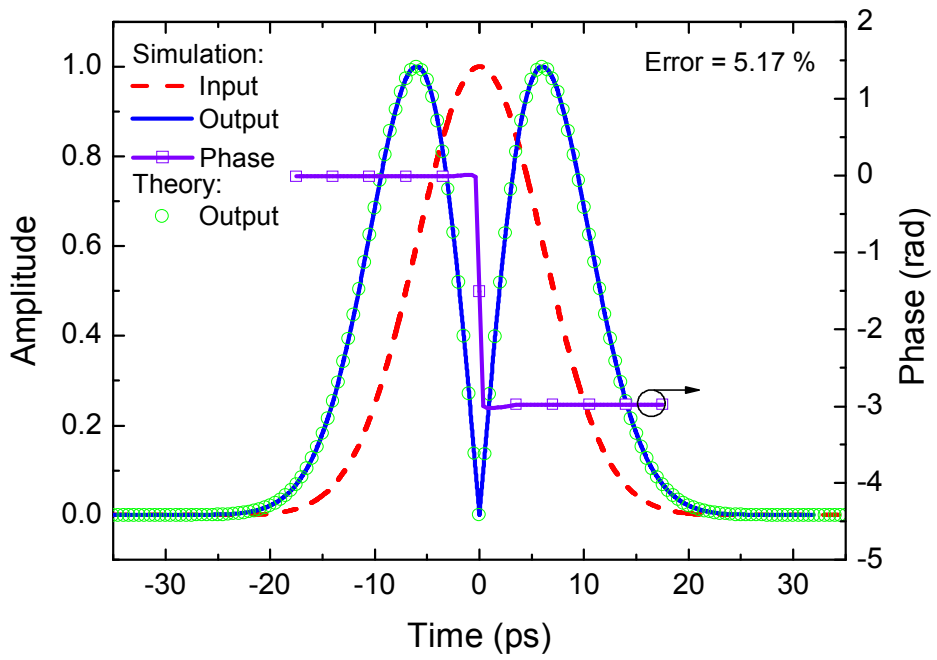


그림 5.30 가우시안 펄스의 1차 광미분 (1310 nm)

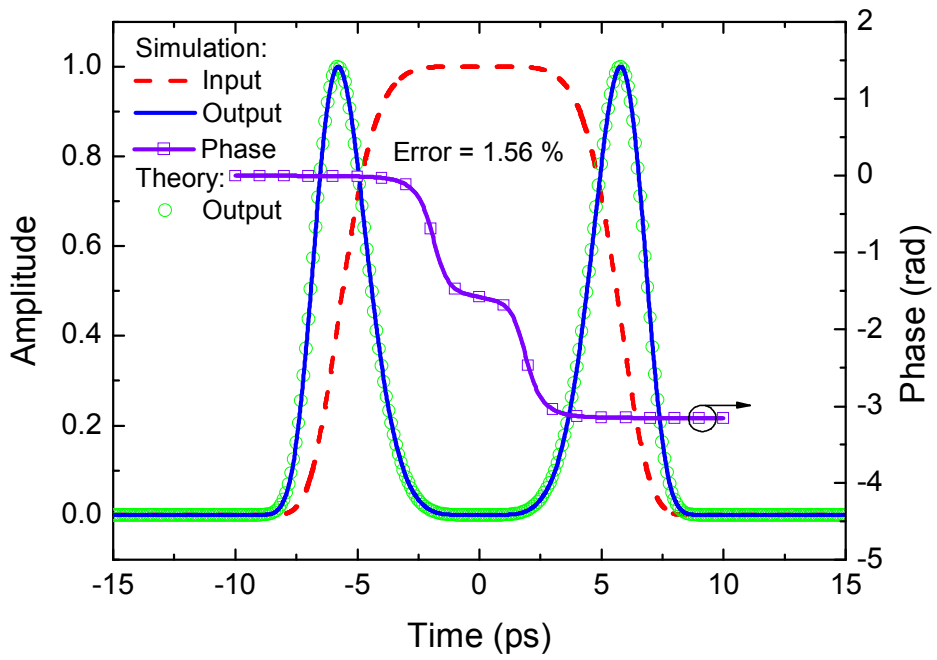


그림 5.31 슈퍼-가우시안 펄스의 1차 광미분 (1310 nm)

표 5.7 다중파장 대칭형 광커플러의 광미분 오차

	가우시안	슈퍼-가우시안
1차 광미분(@1550 nm)	5.62%	1.55%
1차 광미분(@1310 nm)	5.17%	1.56%

제6장 결론

본 논문에서 새로운 형태의 비대칭형 광커플러, 대칭형 광커플러를 이용한 광미분기를 제안하였으며, 제안된 광미분기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 1차, 2차 광미분기로 작동됨을 증명하였다. 비대칭형 광커플러는 커플링 계수(C)와 커플링 영역의 길이(L)에 곱의 조건에 따라 1차, 2차 광미분기로 사용할 수 있다. 또한 대칭형 광커플러는 1차 광미분기로 사용할 수 있으며, 커플링 영역의 길이(L)와 커플링 영역의 간격(d)를 조절하여 한 파장영역에서 사용하는 단일파장 대칭형 광커플러와 두 파장영역에서 사용하는 다중파장 대칭형 광미분기로 제작할 수 있다. 비대칭형 광커플러는 두 종류의 광섬유를 이용하여 제작되는 특징으로 광섬유의 전파상수 특성에 따라 커플링 파장이 바뀌게 되어 미분기 제작시 커플링 파장에 맞는 광섬유를 결정해야 하기 때문에 다소 제작의 어려움을 가지게 된다. 하지만 1차, 2차 광미분을 진행할 수 있어 대칭형 광커플러에 비해 성능면에서 우수한 특성을 가지고 있다. 대칭형 광커플러는 동일 광섬유로 제작되기 때문에 제작이 쉬운 장점이 있지만 1차 미분만 가능하여 비대칭형 광커플러 보다 성능은 다소 떨어진다.

제작된 광커플러의 수학적 미분과의 최대 미분오차는 시뮬레이션으로 확인한 비대칭형 광커플러에서 ~2.6%, 단일파장 대칭형 광커플러에서 ~1.57%, 다중파장 대칭형 광커플러에서 ~5.62%였다. 시뮬레이션에서 제안된 광미분기가 수학적 미분과 거의 일치하는 것을 확인하였다. 또한 비대칭형 광커플러를 제작하여 실험을 통해 1차 광미분기로 사용됨을 확인하였다. 제안된 광미분기는 기존 광미분기의 단점인 단위소자 제작의 어려움, 복잡한 구조, 높은 제작비용, 대량 생산의 어려움을 해결할 것으로 기대된다. 본 논문에서는 제작상의 어려움으로 비대칭형 광커플러를 이용한 2차 광미분기와 대칭형 광커플러를 이용한 1차 광미분기를 제작하지 못하였으며, 향후 추가 실험이 필요할 것으로 생각된다. 광커플러를 이용한 광미분기를 평면 도파로 형태로 제작할 경우 단위소자 연결을 통해 고차 광미분이 가능할 것으로 기대되며, 추가 시뮬레이션과 실험이 필요할 것으로 생각된다.

[참고문헌]

- [1] R. Slavík, Y.W. Park, N. Ayotte, S. Doucet, T.-J. Ahn, S. LaRochelle and J. Azaña “Photonic temporal integrator all-optical computing” Opt. Express. Vol. 16 Issue 22. pp. 18202-18210 (2008)
- [2] M. Kulishov and J. Azaña “Long-period fiber gratings as ultrafast optical differentiators” Opt Letters. Vol. 30 Issue 20. pp. 2700-2702 (2005)
- [3] Y.W. Park, T.-J. Ahn, Y. Dai, J. Yao and J. Azaña “All-optical temporal integration of ultrafast pulse waveforms” Opt. Express. Vol. 16 Issue 22. pp. 17817-17825 (2008)
- [4] Y.W. Park, M.H. Asghari, T.-J. Ahn, and J. Azaña “Transform-limited picosecond pulse shaping based on temporal coherence synthesization” Opt. Express. Vol. 15 Issue 15. pp. 9584-9599 (2007)
- [5] M. Kulishov and J. Azaña, “Long-period fiber gratings as ultrafast optical differentiators” Opt. Letters. Vol. 30 Issue 20. pp. 2700-2702 (2005)
- [6] Y. Park, J. Azaña, and R. Slavík, “Ultrafast all-optical first- and higher-order differentiators based on interferometers” Opt. Letters. Vol. 32 Issue 6. pp. 710-712 (2007)
- [7] D. Marcuse, “Theory of dielectric optical waveguides” Chap. 6, 7, Academic Press Inc. (1991)
- [8] A. W. Snyder and J. D. Love “Optical waveguide Theory” Part. 2, Chapman and Hall (1983)

- [9] S. Lacroix, R. Bourbonnais, F. Gonthier and J. Bures “Tapered monomode optical fibers: understanding large power transfer” *App. Optics*. Vol. 25 Issue 23. pp. 4421-4425 (1986)
- [10] R. Slavík, Y.W. Park, M. Kulishov, R. Morandotti and J. Azaña “Ultrafast all-optical differentiators” *Opt. Express*. Vol. 14 Issue 22. pp. 10699-10707 (2006)
- [11] J. Azaña., Y.W. Park, T.-J. Ahn and R. Slavík, “All-fiber ultrafast second-order differentiator based on a single uniform long-period fiber grating” *Bragg gratings, Photosensitivity. And in Glass waveguides(BGPP) 2007 Paper: JWA42*.
- [12] X. Jing, Z. Xinliang, D. Jianji, L. Deming, and H. Dexiu, “All-optical differentiator based on cross-gain modulation in semiconductor optical amplifier” *Opt. Letters*. Vol. 32 Issue 20. pp. 3023-3031 (2007)
- [13] J. Azaña, L.K. Oxenlowe, E. Palushani, R. Slavík, M. Galili, H.C.H. Mulvad, H. Hu, Y.W. Park, A.T. Clausen and P. Jeppesen “In-fiber sub-picosecond pulse shaping for nonlinear optical telecommunication data processing at 640 Gbit/s” *International Journal of Optics*. Received 16 June 2011. Accepted 26 September 2011
- [14] R. Slavík, Y.W. Park and J. Azaña. “Tunable dispersion-tolerant picosecond flat-top waveform generation using an optical differentiator” *Opt. Express*. Vol. 15 Issue 11, pp.6717-6726 (2007)
- [15] Y.W. Park, M. Kulishov, R. Slavík and J. Azaña “Picosecond and sub-picosecond flat-top pulse generation using uniform long-period fiber gratings” *Opt. Express*. Vol. 14 Issue 26. pp. 12670-12678 (2006)

[16] L. Fangxing, Y.W. Park and J. Azaña, "Complete temporal pulse characterization based on phase reconstruction using optical ultrafast differentiation (PROUD)" Opt. Letters. Vol. 32. Issue. 22. pp. 3364-3366 (2007)

[감사의 글]

이제 세상을 향해 새로운 첫 발걸음을 내딛으려 합니다. 2년 동안 저를 지켜봐 주시고 많은 격려와 도움을 주신 분들께 이 글을 통해 감사의 마음을 전해드리고자 합니다.

먼저, 부족한 저에게 학문적 기틀을 잡아주시고 지금의 제가 있을 수 있게 지속적인 가르침과 격려를 해주신 안태정 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 교수님께 배웠던 연구자의 마음가짐과 삶에 대한 성실한 태도를 마음속에 깊이 새기고 열심히 살아가겠습니다. 대학원 과정동안 많은 가르침을 주신 김진태 교수님, 김현수 교수님, 박종락 교수님, 권민기 교수님, 주기남 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

실험실 식구로, 3년 반 동안 고생한 최동석형, 논문의 카티아 디자인에 도움을 준 송일신, 시뮬레이션에 도움을 준 김찬영에게 고맙다는 말을 전해드립니다. 대학원 생활동안 같이 고생한 문동준형, 김건국형, 최훈국, 박기찬, 아드난드, 하페즈, 김훈, 신성선, 김명진, 안철용, 김광우, 최판주, 최유민, 배호준, 강용진, 김수아에게 고마움을 전합니다. 그리고 힘들 때 격려를 많이 해준 최호형 에게도 고마움을 전해드립니다.

오래 전부터 저에게 힘이 되어준 조대부고 친구들, 정병규, 이현태, 고경훈, 유형규, 여진영, 박종배, 김현중, 남궁문세, 최웅배, 초등학교 때부터 함께한 김운택 언제나 하는 일이 잘 되길 빌며, 앞으로 인생을 살아가면서 항상 함께했으면 합니다.

주말이면 만나서 운동하며 즐거운 시간을 보낸 우리 무들가온누리 식구들, 김경태형, 김경태, 고대진, 이현성, 김선누나, 김성민형, 김창진형, 나관훈, 박진형, 성민희누나, 송해준, 이현행형, 김재훈형, 정석현형, 정성국형, 김한글형, 홍석진형, 홍준희형, 노진형님께도 고마움을 전해드립니다.

마지막으로 제가 지금까지 살아갈 수 있게 힘을 주시고, 평생 고생만 하신 어머니, 하늘에서 지켜보고 계실 아버지, 저를 키워주신 할머니, 고마운 동생 회승이, 항상 힘을 주시고 챙겨주신 외할머니, 외삼촌, 이모들, 이모부들에게도 고마움을 전해드립니다.

이 외에 미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무나 많습니다. 그 분들의 이름 하나하나 되새기지 못함을 죄송하게 생각하며, 대신 제 깊은 감사의 말로 이 글을 마칠까 합니다. “모두들 정말 감사드립니다.”

본 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.