



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 2월  
석사학위 논문

# 펨토초 레이저의 가간섭 펄스 결합 연구

조선대학교 대학원  
광기술공학과  
정희원

펨토초 레이저의 가간섭 펄스  
결합 연구

Research on coherent pulse combining  
using a femtosecond laser

2017년 2월 24일

조선대학교 대학원

광기술공학과

정 희 원

# 펨토초 레이저의 가간섭 펄스 결합 연구

지도교수     주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 신청 논문으로  
제출함

2016년 10월

조선대학교 대학원

광기술공학과

정 희 원

## 정희원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 (인)

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 (인)

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 (인)

2016년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

제1장 서론 .....	1
제1절 연구 배경 .....	1
제2절 연구 현황 .....	3
(1) 광 결합 .....	3
(2) 위상 제어 방법 .....	6
제3절 연구목표 및 내용 .....	7
제2장 다중 경로 간섭계 및 분할 펄스 증폭 기술을 이용한 소형 가간섭 펄스 결합기 .....	8
제1절 고출력 레이저를 위한 광 증폭 .....	8
(1) 분할 펄스 증폭의 기본 원리 .....	8
(2) 공간 영역에서 분할 펄스 증폭의 기본 원리 .....	9
(3) 시간 영역에서 분할 펄스 증폭의 기본 원리 .....	10
(4) 초소형 T-DPA 모듈 설계 및 효율 .....	13
제2절 펄스초 광 결합기 모듈 안정화 .....	19
(1) LOCSET 안정화 방법 .....	19
제3장 실험 결과 .....	22
제1절 다중 경로 간섭계 기반 초소형 T-DPA 모듈 .....	22
(1) 시간 영역에서 분할 펄스 모듈 설계 및 구성 결과 .....	22
제2절 펄스 결합제어 기초실험 .....	28
(1) LOCSET 방법 및 PID 제어 결과 .....	28
제3절 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합 .....	34

(1) 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합 .....	34
(2) 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합 제어 및 결과 .....	35
<b>제4장 고찰 및 논의</b> .....	42
(1) 다중 경로 간섭계 기반 가간섭 펄스 결합 모듈 .....	42
(2) 모듈의 제어 안정도 평가 .....	43
(3) 증폭기의 추가 구성 .....	43
<b>제5장 결론</b> .....	44
<b>【참고문헌】</b> .....	45

## 그림 목 차

Fig. 1-1 처프 펄스 증폭 방법 .....	2
Fig. 1-2 광 결합 방법 .....	5
Fig. 1-3 펨토초 펄스 레이저의 다차원적인 가간섭 펄스 결합 방법 .....	5
Fig. 2-1 분할 펄스 증폭 개념 .....	8
Fig. 2-2 공간 영역에서 분할 펄스 증폭 개념 .....	10
Fig. 2-3 시간 영역에서 분할 펄스 증폭 개념 .....	12
Fig. 2-4 초소형 T-DPA 모듈의 개념도 .....	14
Fig. 2-5 펄스 결합이 가능한 초소형 T-DPA 모듈의 개념도 .....	15
Fig. 2-6 PBS에서 각 부품에 대한 정렬 .....	16
Fig. 2-7 LOCSET 방법의 모식도 .....	19
Fig. 2-8 LOCSET 방법의 개략도 .....	20
Fig. 3-1 다중 경로 간섭계를 이용한 시간영역에서의 분할 모듈 .....	23
Fig. 3-2 실제로 구성된 다중 경로 간섭계 기반 가간섭 광 분할 시스템 .....	24
Fig. 3-3 가간섭 광 분할 시스템에 사용된 yb-femtosecond laser .....	25
Fig. 3-4 광 출력 측정 장치 .....	26
Fig. 3-5 분할 된 펄스를 검출하기 위한 광 검출기 .....	26
Fig. 3-6 분할 모듈 통과 결과 .....	27
Fig. 3-7 펄스 결합 제어 기초실험 구성 .....	29
Fig. 3-8 기초 제어 실험에 사용된 광원 .....	31
Fig. 3-9 기초 제어 실험에 사용된 PZT 및 PZT 제어기 .....	31
Fig. 3-10 LOCSET 방법에 사용된 lock-in-amplifier .....	31
Fig. 3-11 LOCSET 방법에 사용된 PID control 및 summing amp .....	32
Fig. 3-12 LOCSET 제어 방법의 모식도 .....	32
Fig. 3-13 광 검출기 신호와 위상 오류 신호 결과 .....	33



Fig. 3-14 PID 제어 전과 제어 후의 결과 .....33  
 Fig. 3-15 통합된 초소형 T-DPA 모듈의 설계 및 광경로 .....35  
 Fig. 3-16 실제로 구성된 펄스 분할 결합 모듈 .....36  
 Fig. 3-17 두 가간섭 펄스 결합의 간섭 신호 결과.....38  
 Fig. 3-18 LOCSET 방법을 통합 제어 신호 결과.....39  
 Fig. 3-19 단시간 가간섭 펄스 결합의 PID 제어 결과 .....39  
 Fig. 3-20 장시간 가간섭 펄스 결합의 PID 제어 후 세기 변화.....40  
 Fig. 3-21 PID 제어의 Allan deviation을 통한 안정도 평가 .....41

## 표 목 차

Table. 1 초소형 T-DPA 모듈에 사용되는 광학 부품의 존스 행렬 .....17  
 Table. 2 초소형 T-DPA 모듈 구성을 위한 광학 부품의 사양 .....25  
 Table. 3 펄스 결합 제어 기초실험 구성을 위한 광학 부품의 사양 .....30  
 Table. 4 통합 분할 결합 모듈의 구성을 위한 광학 부품의 사양 .....37

# ABSTRACT

## Research on coherent pulse combining using a femtosecond laser

Hee Won Jung

Advisor : Prof. Ki-Nam Joo, Ph D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

Laser manufacturing is essential for scribing a fine texture, drilling small holes and sharply cutting plates. Even, manufacturing with the aid of femtosecond pulses have become important to obtain high quality products because it can reduce debris which can be generated in the other laser manufacturing processes. In this case, the energy of the single femtosecond pulse is mainly considered and it should be amplified for various application fields. The typical amplification of femtosecond pulses can be achieved with pulse stretching, i.e. chirped pulse amplification (CPA), to avoid the damage of the amplifying medium but the single pulse CPA still has practical limitation when the pulse energy is higher than the damage threshold of the medium. Thus, another amplification method is needed.

Divided pulse amplification (DPA), which combines individually amplified pulses after dividing pulses spatially and temporally, can be a good candidate to obtain ultra-high pulse energy. However, one of drawbacks of DPA is the large size of the system because it is based on interferometric technique and the optical path difference should be long enough to separate the pulses temporally.

In this investigation, we propose a compact temporal DPA system based on the multi-path interferometric technique for industrial application. The total optical path reaches up to a few meters to divide pulses with the order of ns. time interval,

but the size of the system is approximately (0.35 m × 0.35 m) because of the multi-path configuration. For combining the divided pulses, locking of optical coherent via single-detector electronic-frequency tagging (LOCSET) method based on the modulation and demodulation technique was used and the pulses could be coherently combined to generate constructive interference. The LOCSET method was configured with a commercial lock-in-amp, and the modulation frequency used in the modulation was 35 Hz. The control signal was obtained by the lock-in-amplifier and was tuned by a PID controller. When the PID control was off, the interference signal was fluctuated seriously, but the interference signal maintains the constructive interference, which shows the coherent pulse combination, during the control status. Consequently, we obtained the stability of the compact T-DPA module as the Allan deviation of  $2.97 \times 10^{-2}$  (1 s.). As the experimental results, the femtosecond pulses were successfully divided and coherently combined in the compact T-DPA module and it is expected that the proposed system can be applied to achieve the industrial high power femtosecond pulse lasers.

key words: coherent pulse combining, divided pulse amplification, temporal-divided pulse amplification, multi-path interferometric technique, compact T-DPA module,

# 제1장 서론

## 제1절 연구 배경

오늘날 펄스 레이저 (pulse laser)는 광과학, 광기술, 정밀 계측 분야 등의 분야에서 전반적으로 다양하게 사용되고 있으며, 또한 정밀 가공 분야에서 펄스 레이저를 활용한 가공 수요 역시 급증하고 있다. 그중 초정밀 미세 가공 분야에서 최근 펨토초 레이저 (femtosecond laser)는 좁은 펄스 폭으로 인한 가공 정밀도가 높아 많은 연구가 진행되고 있고 또한 다양하게 활용되어지고 있다. 이와 함께 현재 산업계에서는 초정밀 미세 가공 분야의 생산성 증대를 위해 고출력 펄스 레이저에 대한 수요가 증가하고 있으며, 세라믹 등과 같은 난가공 분야에서 역시 레이저 펄스의 높은 에너지를 요구하고 있다.

기존에 초정밀 미세 가공 분야에 사용되던 연속파 레이저 (continuous-wave laser, cw laser) 및 나노초 (nanosecond), 피코초 (picosecond) 펄스 레이저의 경우, 레이저를 조사한 가공 면을 확인하면 비교적 광의 조사 시간이 길기 때문에 조사된 면에는 용융 영역 (melt zone)이 생기는 문제가 발생한다. 또한, 전자 (electron) 진동으로 충격파가 발생하여 조사된 부위에 이 진동이 전달되면서 가공매질에 마이크로 크랙 (micro crack) 및 재료의 열 변형, 표면의 왜곡 (surface ripples)에 의한 작은 잔해 (debris) 등이 발생하는 문제 [1][2]가 대두되고 있다. 이는 조사하는 레이저의 펄스 폭이 넓어 조사하는 시간이 길기 때문에 발생하는 문제로 이들 레이저를 이용한 초정밀 미세가공은 한계를 가지고 있음을 알 수 있다. 하지만 펄스 폭이 좁은 펨토초 펄스 레이저 (femtosecond pulse laser)를 사용한 레이저 가공은 짧은 펄스에 의해 조사 부분이 플라즈마 (plasma) 상태로 직접 변환되어 가공되기 때문에, 조사된 주위에 잔해 현상이나 표면 왜곡현상 등이 거의 없이 깔끔하게 가공되는 특징이 있고, 이로 인해 산업계의 초정밀 미세 가공분야에서 고출력 펨토초 펄스 레이저 기반 레이저 가공 기술을 필요로 하고 있다.

펨토초 레이저는 1980년대에 색소 레이저 (dye laser) 기술로 100 fs 미만의 펨토초 색소 레이저가 처음 등장한 이후 많은 연구를 통해 1987년에는 레이저 외부에 스펙트럼 확장기와 펄스 압축기를 구성하여 6 fs의 짧은 펄스를 가지는 색소 레이저가 개발되었다. 이후 안정성이 떨어지고 유지보수가 어려운 단점을 갖는 색소레이저를 대체하기 위해 고체 레이저 중의 하나인 티타늄-사파이어 (Ti:sapphire) 기반 펨토초 레이저

가 개발되었고, 현재 10 fs 이하의 펄스 폭을 가지는 펨토초 레이저가 상용화되었다. 최근에는 고체 레이저보다 소형이면서 에너지 전달이 쉬운 광섬유 타입의 펨토초 레이저에 대한 많은 연구가 진행되고 있고 이를 활용한 레이저 가공 분야가 주목받고 있다 [3]. 일반적으로 펨토초 펄스 레이저는 비교적 낮은 평균 출력을 가지기 때문에, 이를 고출력 레이저로 활용하기 위해서 광증폭 방법을 사용하며, 대표적으로 1985년도에 처음으로 제안된 처프 펄스 증폭 (chirped pulse amplification, CPA) 방법이 사용된다. [4]. 처프 펄스 증폭은 Fig. 1-1과 같이 출력이 낮고 폭이 좁은 펨토초 펄스를 분산 (dispersion)을 줄 수 있는 회절격자 (diffraction grating)를 사용하여 펄스 폭을 확장 (pulse stretching)하고 첨두 출력 (peak power)을 낮춰, 이를 증폭 매질 (amplifying medium)에 통과시킴으로써 증폭 매질의 손상 (damage)을 피함과 동시에 펄스 폭이 넓어진 상태의 증폭된 펄스를 획득하는 방법이다. 증폭된 넓은 펄스 폭을 갖는 펄스는 다시 회절격자를 통과하면서 펄스 폭이 압축 (compression)되고, 결국 고출력의 펨토초 펄스 발진이 가능해진다. 이 방법은 현재 오실레이터 (oscillator)와 선행 증폭기 (pre-amplifier), 주 증폭기 (main amplifier)에서 벌크 (bulk) 타입의 레이저나 광섬유 레이저 (fiber laser)에서 고출력의 펨토초 펄스 생성에 사용되고 있다 [5].

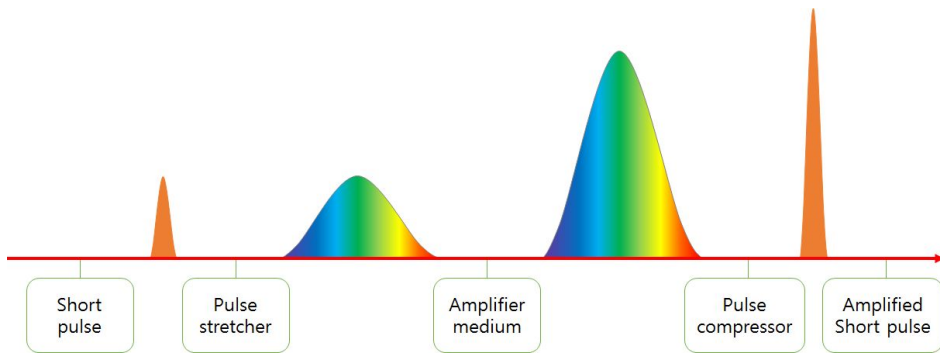


Fig. 1-1 처프 펄스 증폭 (CPA)방법

처프 펄스 증폭 방법은 오실레이터 및 선행 증폭기 등에서 고출력의 펨토초 펄스를 얻을 수 있는 가장 일반적인 방법으로 효율이 높은 편이다. 그러나 처프 펄스 증폭 방법을 사용하더라도 광증폭비가 높아지는 경우, 강한 펄스 출력으로 인해 광학 부품 (optical component)들의 열적 손상 (damage threshold)을 야기될 수 있고, 또한 증폭 매질이나 이득 광섬유 (gain fiber) 역시 손상될 가능성이 있다. 이와 더불어 라만 산란

(Raman scattering)과 브릴루앙 산란 (Brillouin scattering), 자가 위상 변조 (self-phase modulation) 등의 광학적 비선형 효과 (optical nonlinear effect)로 인해 증폭 효율이 감소하는 여러 가지 한계점을 지니고 있다 [6]. 그래서 이러한 단일 펄스의 초프 펄스 증폭 방법의 한계점을 극복하기 위한 대안으로 광 결합 (beam combining, BC) 방법이 제안이 되었고, 세계적으로 광 결합 방법 연구가 이루어지고 있다 [7].

## 제2절 연구 현황

고출력 레이저를 구성하기 위한 광 결합은 결합 원리에 따라 다음과 같이 크게 세 방법으로 분류할 수 있다.

- 파장 광 결합 방법
- 비가간섭 광 결합 방법
- 가간섭 광 결합 방법

이 중에서 가간섭 광 결합 방법은 파장 또는 비가간섭 광 결합 방법과는 달리 위상 제어 기술을 통해 광을 결합하기 때문에 펄스 레이저의 광 결합에 있어 매우 적합하다. 한편, 가간섭 광 결합에 있어 위상 제어 기술은 다양한 원리로 구현되고 있으며, 다음과 같이 대표적인 2개의 기술이 현재 널리 활용되고 있다.

- 헤테로다인 위상 잠금 방법
- LOCSET 방법

### (1) 광 결합

광 결합 방법은 Fig. 1-2와 같이 크게 세 가지로 파장 광 결합 방법과 비가간섭 광 결합 방법, 가간섭 광 결합 방법으로 나누어질 수 있다. 파장 광 결합 방법은 서로 다른 파장을 결합하여 레이저 출력을 높일 수 있는 방법으로 파장에 의존하는 광학 부품의 이색 거울 (dichroic mirror), 프리즘 (prisms), 회절격자 (diffraction grating), 파장 다중 분할기 (wavelength division multiplexer)등을 사용하여 Fig. 1-2 (a)와 같이 구성된다. 파장 광 결합 방법의 최대 장점은 시간적인 가간섭 결합이 필요하지 않다는 것으로 시간 및 위상을 맞춰줄 필요성이 없으므로 간단한 광학 구성을 통하여 광을 결

합할 수 있다는 장점과 더불어 고출력에서 안정된 동작을 얻을 수 있다 [8]. 그러나 서로 다른 파장 광을 결합하는 방법이므로 결합하는 파장 광에 비례하여 광세기 자체는 증가하지만, 다수의 파장이 섞이기 때문에 밴드폭 (bandwidth)이 커지고 광 품질 (beam quality)은 저하되는 결과를 초래하므로 펄스 결합에는 적절하지 않다 [9].

비가간섭 광 결합 방법은 Fig. 1-2 (b)과 같이 파장은 같고 위상이 같거나 서로 다른 위상을 가진 광을 결합하는 방법으로 광을 간섭 (interference)시킬 필요가 없으므로, 위상과 광경로를 맞춰줄 필요가 없다. 비가간섭 광 결합 방법은 이렇게 위상을 고려하지 않아도 되기 때문에 파장 광 결합 방법과 마찬가지로 간단한 광학 구성으로 광세기 (intensity)를 증가시킬 수 있지만, 광 품질에 대하여 회절 한계 (diffraction limit)를 가지고 펄스 레이저 사용에 대한 한계를 가지는 단점이 있다 [10].

가간섭 광 결합 방법은 위의 두 방법과는 달리 위상 및 광경로가 동일해야 하는 조건이 필요하며, 이를 위해 위상 제어 방법이 필수이기 때문에 Fig. 1-2 (c)는 같이 구성이 다소 복잡해지는 단점을 가진다 [11]. 그러나 가간섭 광 결합 방법은 결합할 때 각 광의 위상을 고려함과 더불어 좋은 광 품질 및 강한 출력의 펄스 광을 얻을 수 있기 때문에, 펄스 레이저의 광 결합에 있어 유리하고 특히 좁은 펄스 폭을 가지는 펄스 레이저의 광 결합에 있어 가장 적합한 방법이다. 현재 가간섭 펄스 결합 연구는 전세계적으로 다양한 방법이 연구되어지고 있고, 그 중 독일의 한 대학에서 Fig. 1-3과 같이 분할 된 펄스 증폭 방법으로 가간섭 펄스 결합에 대한 연구를 보고하였다 [12]. 이 연구에서는 전체 구성이 크게 시간 분할 영역, 공간 분할 및 증폭 영역, 각각 분할 된 펄스를 결합할 수 있는 결합영역, 마지막으로 가간섭 광 결합을 위한 제어영역으로 나누어져있다.

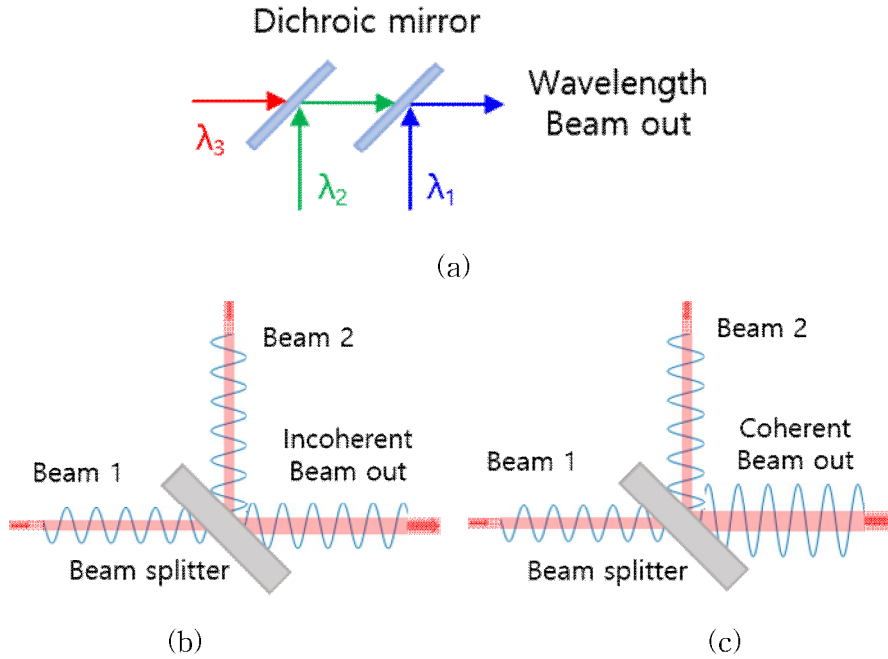


Fig. 1-2 광 결합 방법  
 (a) 파장 광 결합, (b) 비가간섭 광 결합, (c) 가간섭 광 결합

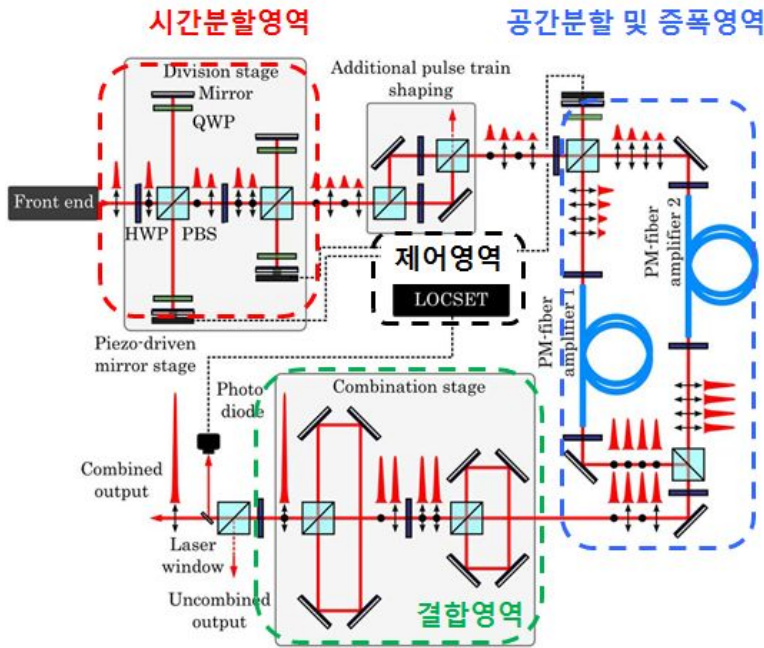


Fig. 1-3 펨토초 펄스 레이저의 다차원적인 가간섭 펄스 결합 방법 [12]



시간 분할영역의 경우 2개의 마이켈슨 간섭계에서 4채널의 지연된 펄스들이 생성된다. 이때, 각각의 펄스들은 마이켈슨 간섭계의 구성을 통해 6 ns의 시간 간격을 가지게 되고, 이렇게 분할 된 4채널의 펄스들은 공간분할에서 다시 2채널로 분할되어 총 8개의 펄스가 2개의 광 증폭기를 통과한다. 이후 증폭된 펄스들은 결합영역에서 위상 제어를 통해 결합한다. 이 연구에서 제안된 가간섭 광 결합 방법은 펄스초 레이저 펄스의 가간섭 광 결합 방법에 있어 시간 영역과 공간 영역을 두루 활용하여 효율을 높이는 방법이며, 고출력의 펄스초 레이저 펄스를 생성하는 데 있어 매우 효과적이지만 전체적인 광학 구성이 매우 큰 단점을 가진다. 특히, 시간 영역에서 지연된 펄스를 생성하기 위해 마이켈슨 간섭계의 길이는 각각 1.8 m와 0.9 m의 크기로 길어지는 동시에 결합 모듈 역시 같은 간섭계 또는 경로 지연을 필요하므로 전체 시스템 자체가 너무 커서 산업계에 적용하기 힘들다.

## (2) 위상 제어 방법

가간섭 광 결합에 있어 필수적인 위상 제어 방법 중의 하나인 헤테로다인 위상 잠금(heterodyne phase locking) 방법은 레이저 단일 오실레이터에서 나오는 레이저 광을 두 부분으로 나누어, 하나는 음향 광학 변조기(acousto-optic modulator, AOM)을 통과하여 광주파수를 천이시키고, 이를 또 다른 광과 결합하여 맥놀이 주파수(beat frequency) 신호의 위상을 잠금 하는 방법을 이용한다 [13]. 헤테로다인 위상 잠금 방법의 경우 광 배열마다 그에 상응하는 수량의 광 검출기가 필요하고 동일한 채널 수에 따라 음향 광학 변조기 역시 필요하므로 시스템의 크기가 비교적 커지기 때문에 다채널로 구성하기 힘든 단점이 있다 [14].

한편, LOCSET(locking of optical coherence via single-detector electronic-frequency tagging) 방법은 위상 잠금을 하기 위해 참조 광(reference beam)과 위상 제어하는 광으로 나누어지게 되고 RF 변조(modulation), 복조(demodulation) 기법을 통해 광 결합 시스템에 서로 다른 광에 대해서 측정된 각 광의 위상차에 비례하는 제어 신호를 발생시키고 이를 통해 위상을 제어하는 방법이다 [15]. LOCSET 방법은 하나의 광 검출기로 다채널의 위상 제어 시스템 구성이 가능하므로 헤테로다인 위상 잠금보다 소형화로 다채널을 이룰 수 있는 장점이 있는 동시에 위상 제어 및 잠금 성능 역시 기존의 위상 제어 방법들과 비교하여 매우 우수하다.

### 제3절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 산업계에서 요구하는 펨토초 레이저의 효과적인 광증폭을 위한 가간섭 광 결합 방법에 대한 연구를 진행하고, 이를 발전시켜 분할 펄스 증폭 (divided pulse amplification, DPA) 방법을 통한 초소형 펨토초 펄스 광 증폭기를 개발한다. 기존의 펨토초 레이저 펄스의 가간섭 펄스 결합 방법은 분할 펄스 증폭 시스템이 상당히 커지는 단점을 지니고 있어 실험실 연구단계에서 사용할만한 기술단계이지만, 상용화에는 한계를 가진다. 그래서 본 연구는 다중 경로 간섭계 기반의 시간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방식을 도입함으로써, 시스템을 소형화하고 상용화가 가능한 광 증폭 모듈을 구현하는 것을 목표로 한다. 다만, 본 논문에서는 광 증폭기 (optical amplifier) 구성에 앞서 초소형 펨토초 레이저 펄스 분할/결합 모듈 설계에 초점을 맞추어 진행하고, 이를 제작하여 실험적 검증을 하는 연구에 집중하였다. 또한, 펨토초 펄스가 가간섭 광 분할 모듈에서 분할되고, LOCSET 제어를 통해 펄스가 가간섭 결합함을 검증함으로써 초소형 펨토초 펄스 광 증폭기의 가능성을 확인과 더불어, 펄스 분할 및 결합 모듈의 효율을 검증하는 것을 목표로 한다.

이를 위해 본 연구의 세부 연구내용은 다음과 같다.

- 분할 펄스 증폭 방법의 이론 및 제안
- 상용화를 위한 초소형 T-DPA 모듈 설계 및 제작
- 펨토초 펄스 레이저의 펄스 분할
- 가간섭 펄스 결합을 위한 기초실험 LOCSET 제어
- 펨토초 펄스 레이저의 가간섭 펄스 결합 및 효율 성능 평가
- 초소형 T-DPA 모듈의 광 결합 안정도 평가

본 논문은 2장에서 가간섭 펄스 결합을 분할 펄스 증폭 방법으로 제안하는 이유와 그 중 시간 영역에서 분할 펄스 증폭 모듈의 큰 구성을 가지는 한계로 인한 초소형 T-DPA 모듈 도입과 효율을 언급하였다. 또한, 가간섭 펄스 결합을 제어하기 위한 LOCSET 시스템 설명을 하였고, 3장에서 실험 결과를 통해 구성한 초소형 T-DPA 모듈 및 가간섭 펄스 결합 시스템의 성능을 평가하는 내용을 정리하였고, 4장에서 고찰 및 논의 마지막 5장은 결론으로 구성하였다.

## 제2장 다중 경로 간섭계 및 분할 펄스 증폭 기술을 이 용한 소형 가간섭 펄스 결합기

### 제1절 고출력 레이저를 위한 광 증폭

#### (1) 분할 펄스 증폭의 기본 원리

펄스 레이저의 증폭을 위해서는 서론에서 언급한 바와 같이 단일 펄스 CPA 방법이 아닌 분할 펄스 증폭 (divided pulse amplification, DPA) [16] 방법이 보다 효율적이며 동시에 광학 부품 및 증폭 매질에 손상을 줄일 수 있는 장점이 있다. 펄스 레이저의 분할 펄스 증폭은 가간섭 광 결합 (coherent beam combining)을 기본으로 구현되며, Fig. 2-1과 같이 크게 세 부분으로 분할기 (divider), 증폭기 (amplifying medium), 결합기 (combiner)로 구성될 수 있다. 먼저 입력광으로 펄스 폭이 확장되고 첨두 출력 (peak power)이 낮아진 펄스가 분할기에 입사하여 시간 또는 공간적으로 분할되고, 이렇게 여러 채널로 분할 된 펄스들은 각각 증폭기를 통과하여 증폭된 후, 결합기에서 하나의 펄스로 결합되어 높은 에너지의 펄스를 생성한다. 결합기의 출력 펄스는 마지막으로 광 펄스 압축기를 통해 펄스 폭이 좁은 상태의 높은 첨두 출력을 가지는 레이저 펄스가 되고, 이러한 과정을 통해 고출력 펄스 레이저 생성이 가능해진다. 일반적으로 고출력 펄스 레이저를 얻기 위한 분할 펄스 증폭의 방법으로는 시간 영역 및 공간 영역 분할 펄스 증폭 방법으로 나뉜다.

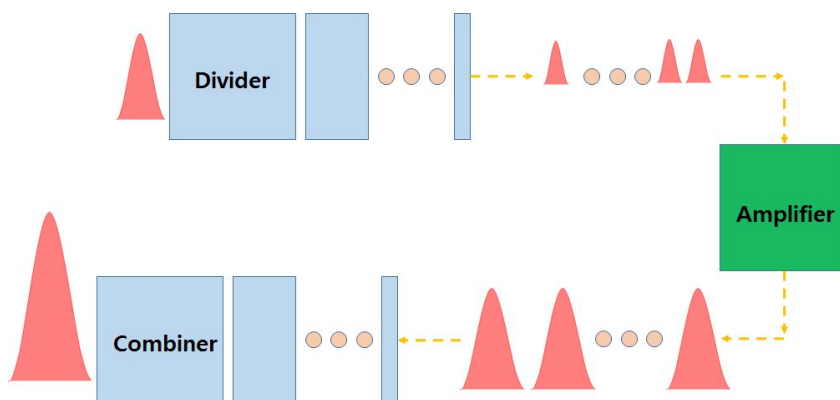


Fig. 2-1. 분할 펄스 증폭의 개념

## (2) 공간 영역에서 분할 펄스 증폭의 기본 원리

일반적으로 알려진 분할 펄스 증폭 방법은 공간 영역에서 분할 펄스 증폭 (spatial-divided pulse amplification, S-DPA)으로써, 펄스를 공간적으로  $n$ 개의 채널로 분할하여 각각의 광 증폭기를 통해 증폭시킨 후, 결합기를 통해 분할 된 펄스들은 하나의 펄스로 결합하여 고출력 펄스를 생성시킨다. 이때 분할기로는  $1 \times n$  격자 분할기 (grating splitter),  $1 \times n$  분할기 (splitter) 그리고 2채널로 쉽게 분할 가능한 BS (beam splitter) 등과 같은 광학 부품들이 사용되며, 반대로 결합에 사용되는 펄스들은  $n \times 1$  격자 분할기 또는  $n \times 1$  커플러 (coupler) 등의 결합기나 위상 반전기 (phase conjugator) 등을 통해 공간적으로 결합된다. 기본적인 공간 영역의 분할 펄스 증폭기로는 Fig. 2-2과 같은 마하젠더 간섭계 (Mach-Zehnder interferometer) 기반의 증폭기를 생각할 수 있다 [12]. 증폭기에 입사하는 선형 편광 된 펄스 펄스는 HWP (half wave plate)에 의해 편광 상태가  $45^\circ$  선형 편광으로 바뀌고 이중 p-편광 펄스는 첫 번째 PBS (polarization beam splitter)에 의해 투과하게 된다. 한편, s-편광 펄스는 PZT에 장착된 mirror에 반사하고 다시 PBS로 되돌아가는 과정에서  $45^\circ$  회전된 QWP (quarter-wave plate)를 두 번 통과하면서, 편광 상태가 p-편광으로 바뀌어 PBS에서 투과하게 된다. 각각 투과한 펄스들은 증폭기와 HWP, 광 지연 (optical delay)등을 통과하고 난 이후, PBS에서 결합한다. 이때, 가간섭 광 결합을 위해서는 공간적으로 서로 나누어진 두 펄스들의 광경로 길이 (optical path length, OPL)를 일치시켜주어야 하며, 이를 위해 거시적으로 광경로 지연을 통해 광경로를 맞추어 주고, 이후 PZT를 이용하여 미세하게 광경로를 조정한다.

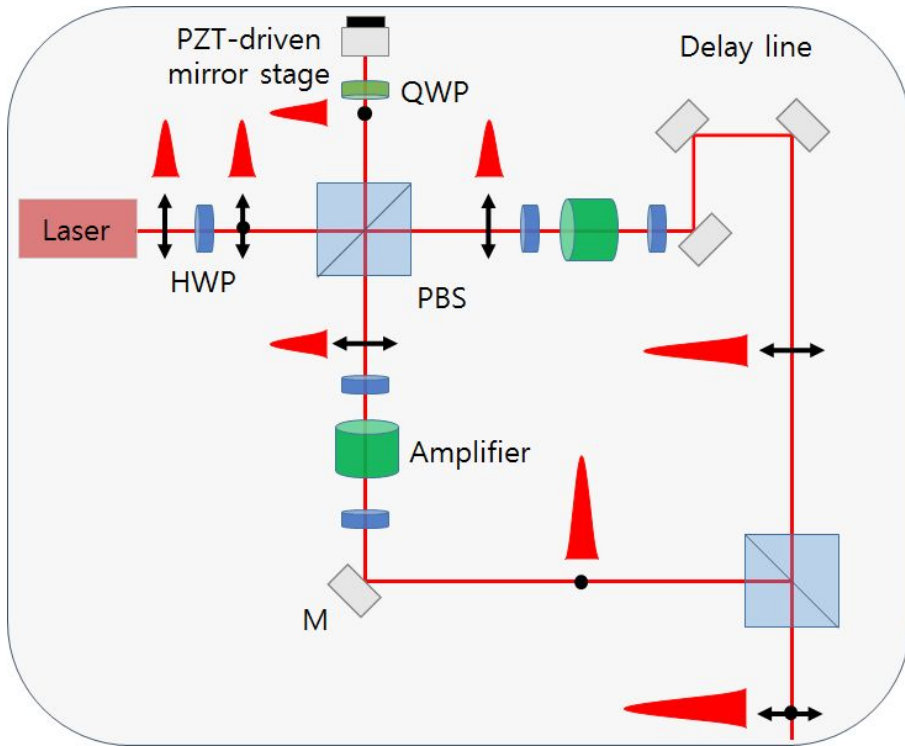


Fig. 2-2 공간 영역에서 분할 펄스 증폭 개념

(Laser: femtosecond laser, HWP: half wave plate, QWP: quarter wave plate PBS: polarizing beam splitter, M: mirror)

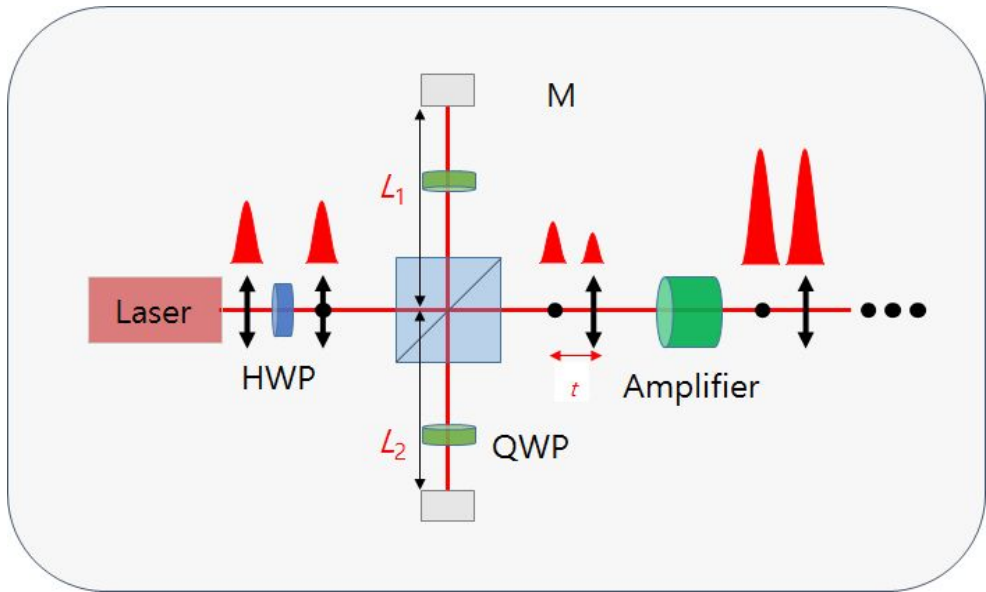
### (3) 시간 영역에서 분할 펄스 증폭의 기본 원리

시간 영역의 분할 펄스 증폭 (temporal-divided pulse amplification, T-DPA) 방법은 증폭 매질의 효율을 끌어내는 동시에 하나의 증폭기에서 여러 개의 펄스를 증폭시키는 방법이다. 일반적으로 펄스가 증폭 매질을 통과하면 일정 이상 증폭이 되지 않아 증폭기에는 다음 증폭 수명 (lifetime)까지 증폭에 사용되지 않은 이득이 매질에 남아있게 된다. 시간 영역의 분할 펄스 증폭은 시간 영역에서 펄스를 분할하여 증폭기에 남아있는 이득을 사용할 수 있는 장점을 통해 증폭기의 증폭 효율을 높일 수 있다. 또한, 시간 영역에서 분할 된 펄스들은 단일 증폭기에서 증폭이 되기 때문에 공간 영역의 분할 펄스 증폭과 비교하면 시스템 비용을 줄일 수 있는 동시에 시스템의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이러한 시간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방법은 일반적으로 간섭계 구성을 기반으로 연구되어지고 있으며, 기존 연구에서는 삭낙 간섭계 (Sagnac

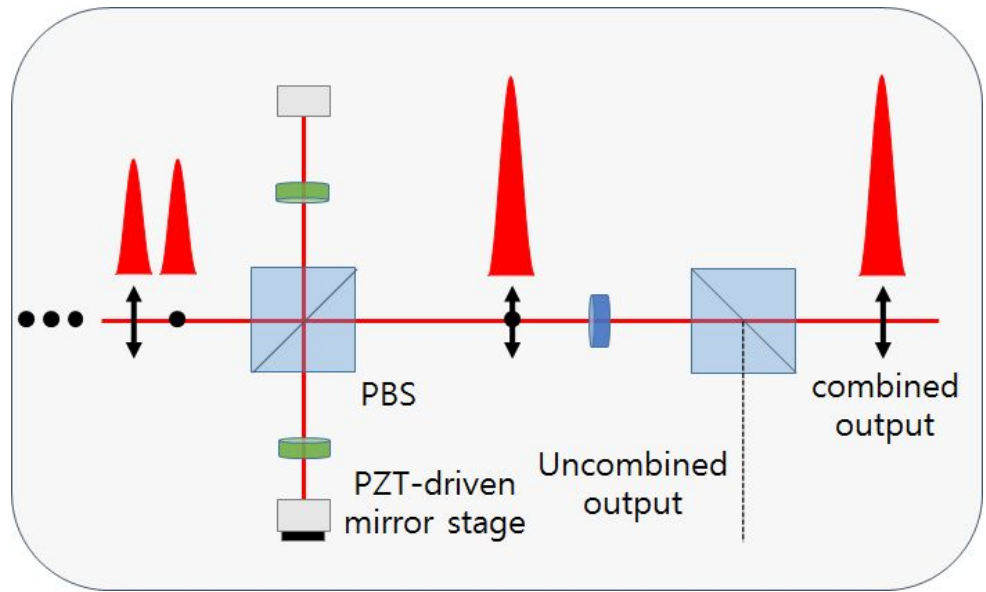
interferometer) [17], 마이켈슨 간섭계 (Michelson interferometer) [12][18]등이 이용되었다. Fig. 2-3은 마이켈슨 간섭계로 구성된 시간 영역의 분할 펄스 증폭 기술의 광학적 구성을 나타낸다. Fig. 2-3 (a)는 시간 영역에서 펄스를 분할시키기 위한 구성을 나타내며, 입력 펄스는 HWP를 통과하면서 편광 상태가 45° 선형 편광 상태를 가지게 되고, 이 중에서 p-편광 펄스는 PBS를 투과한다. 한편, s-편광 펄스는 PBS에서 반사한 후, 간섭계의 mirror에서 반사되어 45° 회전된 QWP에 의해 편광상태가 바뀌어 PBS에서 투과되고, 다시 동일한 원리로 mirror를 반사한 이후 PBS에서 반사되어 펄스 분할기를 빠져나온다. 결국, Fig. 2-3 (a)의 펄스 분할기를 통해 시간 영역에서 나누어진 펄스들은 mirror와 PBS 사이의 거리에 의해 식 (1)과 같은 시간 지연 (t)을 가지게 된다.

$$t = \frac{2(L_1 + L_2)}{c_0} \quad (1)$$

여기서  $L_1$ 과  $L_2$ 는 Fig. 2-3 (a)에서 PBS를 기준으로 위쪽 mirror와 아래쪽의 mirror 사이의 거리를 의미하며,  $c_0$ 는 진공 중에서 빛의 속도이다.



(a)



(b)

Fig. 2-3 (a) 시간 영역에서 분할 펄스 증폭의 광학 구성,

(b) 분할 된 증폭 펄스 결합의 광학구성

(Laser: femtosecond laser, HWP: half-wave plate, QWP: quarter-wave plate, PBS: polarizing beam splitter, M: mirror)

한편, 이렇게 분할 된 펄스는 광 증폭기에서 증폭된 이후 Fig. 2-3 (b)와 같은 펄스 결합기에서 결합된다. 펄스 결합기는 펄스 분할기에 의해 식 (1)과 같이 지연된 시간만큼 이를 보상하기 위해 같은 광경로를 갖는 마이켈슨 간섭계 등으로 구성되며, 최종적으로 펄스들은 시간 영역에서 결합된다. 이때 펄스 결합기에는 광경로 조정을 위해 마이켈슨 간섭계의 한 경로의 mirror에 PZT가 부착되며 이를 통해 가간섭 펄스 결합이 가능해진다.

그러나 Fig. 2-3과 같이 시간 영역의 분할 펄스 증폭 방법을 간섭계로 구성하여 펄스를 분할할 경우, 간섭계의 광학적 경로 차이에 의해 시간 지연이 결정되기 때문에 간섭계의 크기가 커질 수밖에 없고, 분할 된 펄스를 결합하기 위해 같은 형태의 간섭계가 구성되어야 하는 문제가 발생한다. 결국, 전체적인 증폭 시스템은 더욱 커질 수밖에 없고, 이에 따라 산업계에서 요구하는 소형화된 고효율 펄스 레이저에 적용하기에 한계를 가진다. 한편 광섬유 타입으로 시간 영역의 분할 펄스 증폭 시스템을 구성할 경우, 시스템 자체는 소형화가 가능하나 사용되는 광섬유가 증폭된 펄스로 인해 쉽게 손상될 수 있으므로 단일 모드로 발진하는 레이저의 경우 사용하기 어려운 단점을 가지고 있다.

#### (4) 초소형 T-DPA 모듈 설계 및 효율

앞서 설명한 바와 같이 시간 영역의 분할 펄스 증폭 (T-DPA) 방법은 증폭 매질의 효율을 높이기 위한 좋은 방법이지만 전체 시스템의 크기가 매우 크다. 또한, 펄스를 시간 영역에서 다채널로 분할하기 위해서는 이러한 시스템이 직렬로 연결되어야 하므로 산업계 응용에 있어 매우 제한적이다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 초소형의 모듈로 같은 시간 지연 효과를 갖는 다중 경로 간섭계 (multi-path interferometer) 기반의 초소형 T-DPA를 제안한다.

Fig. 2-4는 다중 경로 간섭계 기반의 초소형 T-DPA 모듈의 광학 구성도를 나타낸다. 광원에서 입사하는 선형 편광 상태의 펄스는 HWP<sub>1</sub>에 의해 편광 상태가 45° 선형 편광 상태를 가지게 된다. 이 중에서 p-편광 상태의 펄스는 PBS를 투과하지만, s-편광 상태의 펄스는 PBS에서 반사하여 M<sub>1</sub> 방향으로 향하게 되고 다시 되 돌아온다. 이때 펄스의 편광 상태는 45° 회전된 QWP<sub>1</sub>을 두 번 통과하는 것으로 인해 p-편광으로 바뀌게 되고 PBS를 투과한다. 투과한 펄스는 서로 수직으로 구성된 M<sub>2</sub>에 의해 반사되



며, 이때 공간적으로 다른 방향의 PBS 되돌아간다. 되돌아 간 펄스는 여전히 p-편광 상태를 가지므로 편광 광분할기를 투과한 이후, M<sub>1</sub>에서 반사되어 s-편광 상태의 펄스로 되돌아오며, 같은 원리로 M<sub>3</sub>, M<sub>4</sub>를 반사하고 난 이후, s-편광 상태의 펄스로 M<sub>2</sub>와 PBS에서 반사되어 최종적으로 처음 입사한 p-편광 상태의 펄스와 같은 위치에서 s-편광 상태의 펄스가 나오게 된다. 이때 시간 영역에서 분할 된 편광 상태가 다른 두 펄스는 Fig. 2-4에서와 같은 지연 시간 (t) 를 갖게 되고, 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{2(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 + L_6 + L_7)}{c_0} \quad (2)$$

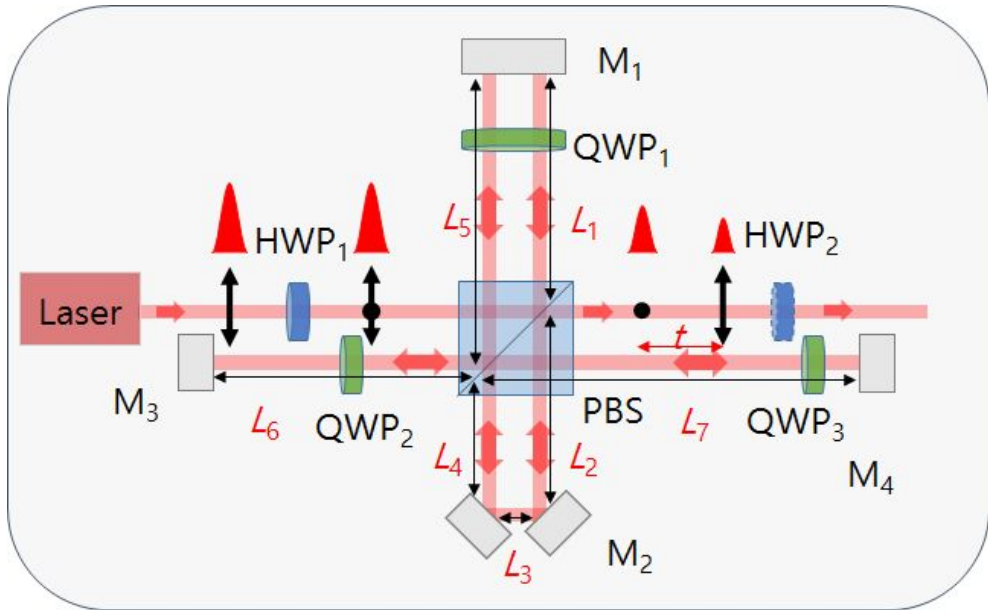


Fig. 2-4 초소형 T-DPA 모듈의 개념도

(Laser: Femtosecond laser, HWP: Half-wave plate, QWP: Quarter-wave plate, PBS: Polarizing beam splitter, M: Mirror)

본 논문에서 제안하는 시간 영역의 분할 펄스 증폭 모듈은 기존 연구에서 사용된 일반적인 간섭계와 달리 다중 경로 간섭계를 도입함으로써 소형화가 가능한 장점이 있다. 또한, 제안하는 모듈은 펄스의 분할과 동시에 펄스의 진행 방향이 반대인 경우가

간접 펄스 결합이 가능하다. 예를 들어, Fig. 2-4의 과정을 통해 시간 영역에서 분할된 펄스들이 증폭기를 통해 증폭된 이후 다시 되돌아오는 경우, 이러한 펄스들은  $45^\circ$  회전된 HWP<sub>2</sub>에 의해 편광 상태가 조정된다. 이때, 펄스 분할시 초소형 T-DPA 모듈에서 시간 지연된 펄스는 p-편광 상태로 조정되어 시간 지연 없이 모듈을 빠져나온다. 한편, 펄스 분할시 시간 지연이 발생하지 않은 펄스는 s-편광 상태로 조정되어, Fig. 2-5와 같은 과정을 통해 시간 지연이 발생한다. 결국, 시간 영역에서 분할된 펄스는 결합시 서로 반대의 광경로를 지남에 따라 가간접 펄스 결합이 가능해진다. 이때 중요한 사항은 펄스의 결합시, Fig. 2-4의 M<sub>3</sub> 대신에 광경로 미세 조절을 위한 PZT가 부착된 M<sub>6</sub>을 사용해야 하는 부분으로, 이를 단일 모듈에서 구현하기 위해 Fig. 2-6과 같이 PBS에서 펄스 분할과 결합에서의 펄스가 지나가는 위치를 다르게 되도록 전체적인 광학 부품들이 정렬된다. 그리고 PZT에 구성된 M<sub>6</sub>를 미세하게 조절하여, 최종적으로 분할된 펄스에 대한 가간접 펄스 결합이 이루어진다.

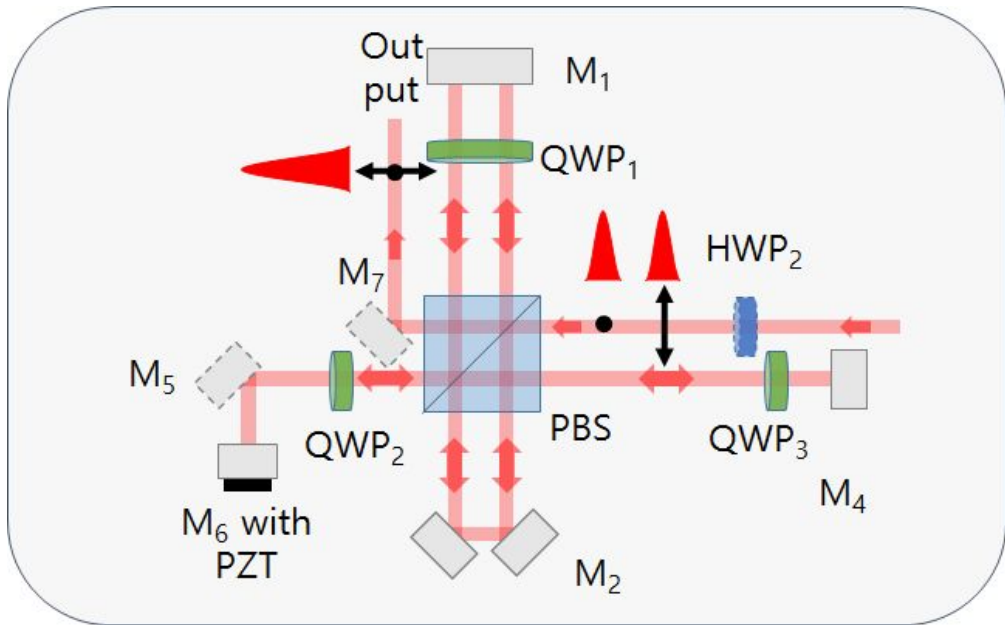


Fig. 2-5 펄스 결합이 가능한 초소형 T-DPA 모듈의 개념도  
(Laser: Femtosecond laser, HWP: Half-wave plate, QWP: Quarter-wave plate, PBS: Polarizing beam splitter, M: Mirror)

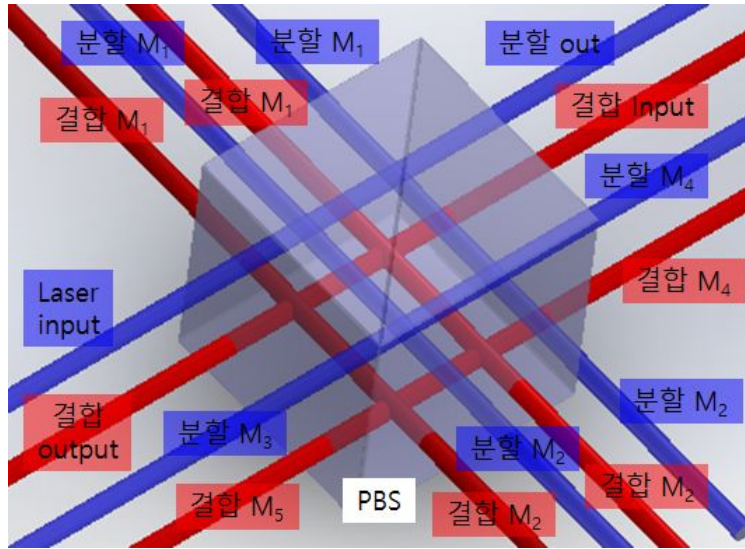


Fig. 2-6 PBS에서 각 부품에 대한 정렬

한편, 초소형 T-DPA 모듈은 Fig. 2-4 및 Fig. 2-5와 같이 펄스들이 상당히 많은 광학 부품 및 광학 면을 투과, 반사하기 때문에, 이때 발생하는 광손실을 고려할 필요가 있다. 이를 분석하기 위해 본 연구에서는 존스 행렬 (Jones matrix)을 기반으로 제안한 초소형 T-DPA 모듈에 대한 이론적인 모델을 정립하고, 사용되는 각 부품의 실질적인 반사율과 투과율을 이용하여 초소형 T-DPA 모듈의 시스템 효율을 예측하였다. 먼저, 제안한 초소형 T-DPA 모듈에서 사용되는 광학 부품들의 존스 행렬은 다음 table. 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 mirror의 존스 행렬은 반사율만을 고려하여 상수로 표현하였고, 또한 각 부품의 표면 반사는 무반사 코팅 (antireflection coating, AR coating) 을 바탕으로 무시하였다.

Table. 1 초소형 T-DPA 모듈에 사용되는 광학 부품의 존스 행렬

optical component	Jones matrix
randomly polarized pulse	$A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$
polarizer	$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
PBS (reflectance)	$P_R = i \begin{pmatrix} \sqrt{1-T_p} & 0 \\ 0 & \sqrt{R_s} \end{pmatrix}$
PBS (transmittance)	$P_T = \begin{pmatrix} \sqrt{T_p} & 0 \\ 0 & \sqrt{1-R_s} \end{pmatrix}$
half wave plate	$H(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \sin(2\theta) & -\cos(2\theta) \end{pmatrix}$
quarter wave plate	$Q(\theta) = e^{i\pi/4} \begin{pmatrix} \cos^2\theta + i\sin^2\theta & (1-i)\sin\theta\cos\theta \\ (1-i)\sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta + i\cos^2\theta \end{pmatrix}$

Fig. 2-4의 초소형 T-DPA 모듈을  $0^\circ$  회전된 HWP<sub>1</sub>에 의해 PBS에서 투과하여 빠져나온 p-편광 상태의 펄스에 대한 존스 행렬  $T$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = P_T \times H(\theta) \times P \times A \quad (3)$$

한편  $45^\circ$  회전된 HWP<sub>1</sub>에 의해 PBS를 반사하여 빠져나온 s-편광 상태의 펄스가 모듈을 경험하고 최종적으로 PBS에서 반사해 빠져나온 펄스에 대한 존스 행렬  $R$ 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R = & P_R^2 \times Q(45)^2 \times P_T \times Q(45)^2 \times P_R \times Q(45)^2 \\
 & \times P_T^2 \times Q(45)^2 \times P_R \times H(\theta) \times P \times A \times M^8
 \end{aligned} \quad (4)$$

Fig. 2-5의 펄스 결합이 가능한 초소형 T-DPA 모듈에서 식 (3)의 p-편광 상태의 펄스는  $45^\circ$  회전된 HWP<sub>2</sub>에 의해 s-편광 상태의 펄스로 변한다. 이를 PBS에 재입사시키면 M<sub>2</sub> 쪽으로 반사를 겪게 되며 펄스가 반대 경로로 모듈을 경험하게 된다. 이후 최종적으로 PBS에서 반사하여 나온 s-편광 상태 펄스의 존스 행렬  $TR$ 은 식 (5)와 같다.

$$TR = P_R \times Q(45)^2 \times P_T^2 \times Q(45)^2 \times P_R \times Q(45)^2 \times P_T \\ \times Q(45)^2 \times P_R^2 \times H(45) \times P_T \times H(\theta) \times P \times A \times M^{13} \quad (5)$$

같은 방식으로 s-편광 상태의 펄스 식 (4)는 45° 회전된 HWP<sub>2</sub>에 의해 p-편광 상태의 펄스가 되고 PBS를 투과를 하고 나온 p-편광 상태 펄스의 존스 행렬 RT는 식 (6)과 같다.

$$RT = P_T \times H(45) \times P_R^2 \times Q(45)^2 \times P_T \times Q(45)^2 \times P_R \\ \times Q(45)^2 \times P_T^2 \times Q(45)^2 \times P_R \times H(\theta) \times P \times A \times M^{11} \quad (6)$$

이렇게 식 (5)와 식 (6)의 존스 행렬을 통해 모듈의 이론적 효율을 알 수 있고, 이를 기존의 연구된 방법과 비교하여 같은 사양의 광학 부품으로 2채널을 구성할 경우, 시간 영역에서 펄스 분할 결합 효율을 비교하면 기존에 연구된 마이켈슨 간섭계의 효율이 약 13 % 높다. 그러나 모듈의 거대하다는 치명적인 단점이 있어, 초소형 T-DPA 모듈이 충분히 사용할 만한 모듈의 효율이라 판단된다.

## 제2절 펄스초 광 결합기 모듈 안정화

### (1) LOCSET 안정화 방법

본 연구에서는 앞절에서 설명한 분할 된 펄스들을 가간섭 결합하기 위한 방법으로 Locking of Optical Coherence via Single-detector Electronic-frequency Tagging (LOCSET) [15] (또는 Pound Drever Hall (PDH) [20]) 방법을 이용하였다. LOCSET 방법은 RF의 변조 (modulation) / 복조 (demodulation) 기법을 통해 펄스들의 광 결합 시 서로 다른 펄스들의 상대적인 위상차에 의한 제어 신호를 이용하여 위상을 제어하는 방법이다. 특히 최종적으로 분할 된 펄스들의 위상을 같게 유지함으로써 안정적으로 결합된 가간섭 펄스를 얻을 수 있는 장점이 있다.

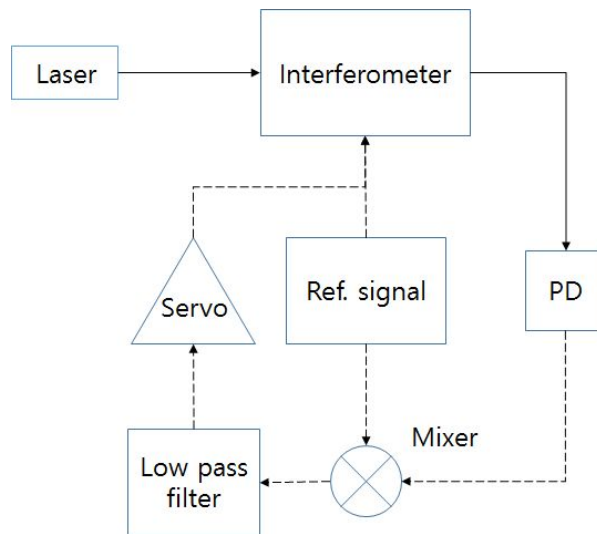


Fig. 2-7 LOCSET 방법의 모식도

Fig. 2-7은 LOCSET 방법에 대한 기본적인 구성도를 나타낸다. Fig. 2-5에서 알 수 있듯이, 펄스 결합기를 통과한 펄스들은 편광기를 통해 간섭계의 원리와 동일하게 광 간섭을 발생시킨다. Fig. 2-5의 PZT에 변조 신호를 인가하면, 간섭 신호 역시 Fig. 2-8과 같이 변조되어 광 검출기 (photodetector, PD)에서 검출되고 이때 획득된 간섭 신호는 광세기에 따라 변조되는 크기가 다르게 된다. 간섭 신호의 변조 크기는 PZT의 변조에 사용된 참조 신호 (Ref. signal)를 이용한 복조를 통해 저역 통과 필터 (low pass filter)의 출력으로부터 Fig. 2-8의 하단부와 같이 추출할 수 있다. 변조된 간섭

신호의 경우, 광세기가 낮은 곳에서는 광세기의 변화량 (기울기)이 크기 때문에 이에 따라 변조 크기가 크며, 광세기가 높은 곳에서는 반대로 변조에 의해 진폭의 변화가 거의 없어 변조 크기는 0이 된다. 또한, 광세기의 변화량이 반대 방향일 때에는 변조 크기가 증가하나 위상이 반대이기 때문에 음의 부호를 가지게 된다. 이러한 변조 크기의 변화는 간섭 신호를 최대로 유지하기 위한 servo의 제어 신호로 사용될 수 있으므로, 이를 이용하여 가간섭 펄스 결합이 가능하다.

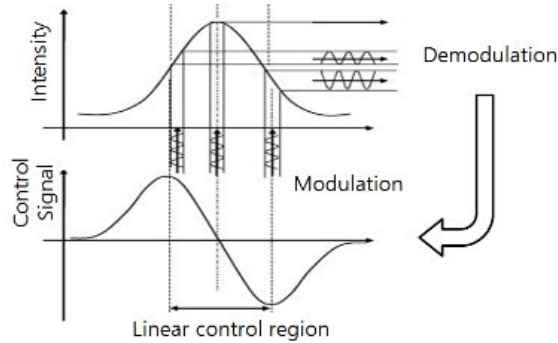


Fig. 2-8 LOCSET 방법의 개략도

LOCSET 방법에 대해 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다. 우선, 수식을 간단히 하기 위해 단파장 광에 대한 전기장  $E_{i0}\cos(\omega_L t + \phi_i)$ 은 자가 동기화 (self-synchronous) 하는 LOCSET이라고 한다면 [21], 시간에 따라 변조된 광의 전기장  $E_i$ 는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i(t) = E_{i0} \cos(\omega_L t + \phi_i + \beta_i \sin(\omega_i t)) \quad (7)$$

여기서  $E_{i0}$ 는 변조된 진폭을 나타내며  $\omega_L$ 은 레이저 주파수 그리고  $\phi_i$ 는 레이저 광의 위상이다.  $\beta_i \sin(\omega_i t)$ 는 PZT 변조에 따른 위상의 변조량으로  $\beta_i$ 는 위상 변조 진폭,  $\omega_i$ 는 변조 광에 대한 무선 주파수 (Radio frequency, RF)이다.

이때 변조된 전기장 식 (7)을 삼각함수의 곱셈 및 덧셈정리를 사용하여 변환하면

$$E_i(t) = E_{i0} \begin{bmatrix} \cos(\omega_L t + \phi_i) \cos(\beta_i \sin(\omega_i t)) \\ -\sin(\omega_L t + \phi_i) \sin(\beta_i \sin(\omega_i t)) \end{bmatrix} \quad (8)$$

가 되어, 식 (7)의 광학적 위상과 위상 변조 각각을 분리할 수 있다. 한편, 광 검출기에서 획득된 간섭 신호에 해당하는 전류  $i_{PD}$ 가 식 (9)와 같이 검출된다.

$$i_{PD}(t) = R_{PD} A \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left( \sum_{i=1}^N E_i(t) \right) \left( \sum_{j=1}^N E_j(t) \right) \quad (9)$$

여기서  $R_{PD}$ 와  $A$ 는 광 검출기에서 응답과 광 검출기의 영역을 나타내고,  $\epsilon_0$ 와  $\mu_0$ 는 각각 자유공간에서의 자기장 및 전기장의 유전율을 나타낸다. 이때, 식 (9)는 각각의 위상이 변조된  $N$  개의 광에 대한 간섭 신호들의 합을 표현하고 있으며, 복조에 의해 발생하는 간섭 신호에 대한 제어 신호 ( $S_c$ )는 참조 신호인  $\sin(\omega_c t)$ 와 적분시간  $\tau$ 의 곱으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_c = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau i_{PD}(t) \sin(\omega_c t) dt \quad (10)$$

식 (10)에서  $\omega_i = \omega_c$  일 때, 적분시간  $\tau$ 는  $(2\pi/\omega_i)$ 와  $(2\pi/|\omega_i - \omega_j|)$ 보다 커야하고, 또한  $i$ 와  $j$ 는 서로 달라야 한다. 그러면  $i$ 번째 전기장에 의해 발생한 간섭 신호에 대한 제어 신호는  $\sin$ 과  $\cos$ 의 직교성에 의해, 식 (10)으로부터 식 (11)과 같이 유도할 수 있다.

$$S_i = R_{PD} \sqrt{P_i} J_1(\beta_i) \left[ \sum_{j=1}^N J_0(\beta_j) \sqrt{P_j} \sin(\phi_j - \phi_i) \right] \quad (11)$$

여기서  $\phi_j$ 와  $\phi_i$ 는 각각  $i$  번째와  $j$  번째 위상 변조 광을 나타낸다. 식 (11)은 Fig. 2-7에서 나타낸 제어 신호의 형태를 보이며,  $\phi_j - \phi_i$ 이 0이 될 때 제어 신호가 0이 되기 때문에, 이를 이용하면 광세기 (intensity)가 높은 지점에서 가간섭 결합이 가능한 것을 확인할 수 있다.



## 제3장 실험 결과

본 논문에서 제안한 고출력의 펄스 레이저를 얻기 위한 초소형 T-DPA 모듈을 실험적으로 검증하고 모듈의 성능 평가를 위해 결과를 분석하였다. 이를 위해 실험은 다음과 같이 세 단계로 나누어 수행하였다.

- 다중 경로 간섭계 기반 초소형 T-DPA 모듈 설계 및 구성
- LOCSET 방법 기초실험 수행
- 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합

먼저, 초소형 T-DPA 모듈은 증폭기의 다음 증폭 수명 (lifetime)까지 증폭에 사용되지 않은 이득을 사용하기 위해 필요한 시간과 펄스 폭을 고려하여 설계, 구성되었으며, 구성된 모듈에서 분할 된 펄스들의 시간 지연에 대한 결과를 평가하였다. 두 번째로, 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합을 하기 위한 기초실험을 통하여 LOCSET 방법을 검증하였다. 마지막으로 초소형 T-DPA 모듈을 이용한 가간섭 펄스 분할 및 결합 실험을 수행하고 분석하였다. 최종적으로 안정적인 가간섭 펄스 결합이 가능한 초소형 T-DPA 모듈을 구현하였으며, 모듈의 펄스 결합 평가 및 Allan deviation을 통한 안정도를 평가하였다. 초소형 T-DPA 모듈 설계 및 구성에서는 증폭기의 다음 증폭 수명 (lifetime)까지 증폭에 사용되지 않은 이득을 사용하기 위해 펄스 폭을 고려한 시간 지연을 가지며 시간 영역에서 펄스 분할의 결과를 평가하였다.

### 제1절 다중 경로 간섭계 기반 초소형 T-DPA 모듈

#### (1) LOCSET 방법 및 PID 제어 실험 및 결과

본 논문에서는 기존 연구와는 달리 다중 경로 간섭계의 원리를 기반으로 초소형 T-DPA 모듈을 설계하였다. 초소형 T-DPA 모듈의 설계함에 있어서 첫 번째로 중요한 것은 모듈의 소형화로, 설계된 모듈은 Fig. 3-1과 같이 0.35 m × 0.35 m의 다중 경로 간섭계를 기반으로 하고 있다. 두 번째로, 초소형 T-DPA는 구성상 펄스들이 복잡한 광경로를 거치기 때문에, 광학계의 정렬을 통해 광이 원활하게 통과할 수 있는지에 대한 확인이 필요하다. 설계된 초소형 T-DPA 모듈은 Fig. 3-1과 같이 기본적인 광경

로가 Fig. 2-4와 동일하지만 한정된 공간 및 광학 부품들, 광학 마운트들의 크기로 인해 약간의 차이를 보인다. 특히,  $M_3$ 와  $M_5$ 를 추가로 구성해서 쓰지 않는 공간을 활용하여 광경로를 보다 길게 확보하였다. 이때 각각의 광경로는 다음과 같이 정의할 수 있다. PBS로부터 나오는 s-편광 상태 펄스가  $M_1$ 에서 다중 반사하고  $45^\circ$  회전된  $QWP_1$ 을 두 번 통과하여 편광이 p-편광 상태로 바뀌면서 PBS에서 투과하기 전까지의 경로를  $L_1$ 으로, p-편광 상태의 펄스가 PBS를 투과하고  $M_2$ 에서 다중 반사를 겪은 후, 다시 PBS의 투과면까지 입사할 때의 광경로는  $L_2$ 로 정의하였다. 또한 s-편광 상태로 바뀐 펄스가 진행되는 PBS의 반사면으로부터  $M_3$ 를 거쳐  $M_4$ 까지의 경로를  $L_3$ , p-편광 상태로 바뀌어 진행되는 PBS의 투과면에서  $M_5$ 를 거쳐  $M_6$ 까지의 경로를  $L_4$ 라고 하였다. 그러면 최종적으로 PBS에 입사하는 s-편광 상태의 펄스는 p-편광 상태의 펄스와 비교하여  $2 \times (L_1, L_2, L_3, L_4)$ 의 광학적 경로 차이를 갖는다.

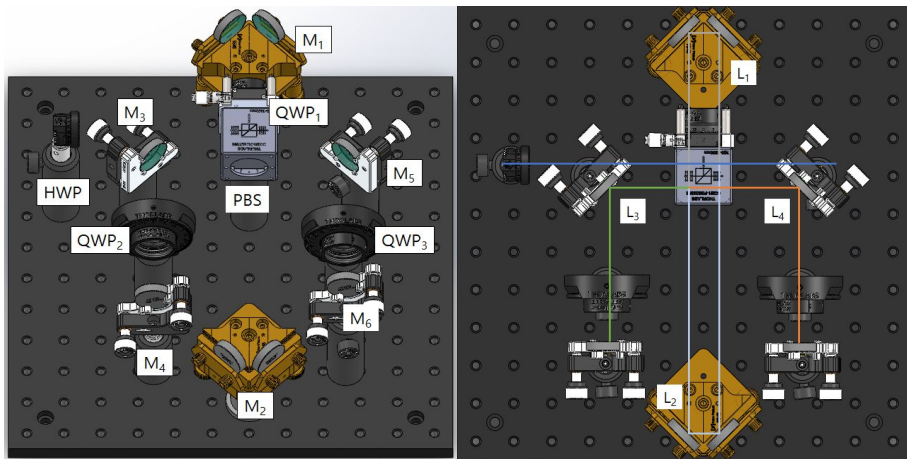


Fig. 3-1 다중 경로 간섭계를 이용한 시간영역에서의 분할 모듈

Fig. 3-2는 본 논문에서 구성한 시간영역에서의 가간섭 광 분할기 모듈 실제 모습을 보여준다. 초소형 T-DPA 모듈에 사용된 광원으로는 Fig. 3-3과 같은 LASERNICS 사의 이터븀 (ytterbium) 계열의 광섬유 펄스 레이저를 사용하였으며, 이 레이저는 1042 nm의 중심 파장에서 대략 500 ps의 넓은 펄스 폭을 가지고 있다. 또한 레이저의 평균 출력은 약 50 mW이고, 빔크기는 5 mm이며, 편광이 정의되어 있지 않다. 그래서 실제 구성은 Fig. 3-1의 설계와는 달리 조리개 (iris) 및 편광기 (polarizer)와 같은 추가적인 광학 부품들이 사용되었다. 먼저, 광 경로의 높낮이 및 각도를 조절하기

위해 2개의 mirror를 사용하였으며, 편광이 정의되지 않은 펄스에 대해 편광기를 이용하여 선형 편광된 펄스로 정의해주었다. 또한, 조리개를 이용하여 레이저 빔의 크기를 줄여주었으며, 펄스들이 모듈 내에서 광학 부품들을 원활히 통과하도록  $M_3$ 와  $M_5$ 를 D-shape mirror로 사용하였다. 본 논문에서 구성한 초소형 T-DPA 모듈의 구성을 위한 광학 부품의 사양은 Table. 2 에 정리하였다.

한편, 초소형 T-DPA 모듈의 분할 효율을 측정하기 위해 Fig. 3-4와 같은 광 출력 측정 장치를 사용하였으며, 입력광은 편광기와 조리개를 통과한 이후의 광으로 정의하여 3.03 mW의 평균 출력을 가짐을 확인하였다. 이때 HWP의 회전을 통해 PBS를 통과하는 p-편광 상태의 출력을 최대로 하였을 때 모듈을 통과하는 펄스광의 출력은 2.42 mW 였으며 반대로 s-편광의 출력을 최대로 하여 시간 지연이 발생하도록 한 펄스 광의 출력은 2.14 mW 였다. HWP의 적절한 회전을 통해 구성한 초소형 T-DPA 모듈에서 시간영역의 분할 된 2개의 펄스는 Fig 3-5와 같은 고속 광 검출기로 검출하여 오실로스코프 (oscilloscope)로 확인하였다.

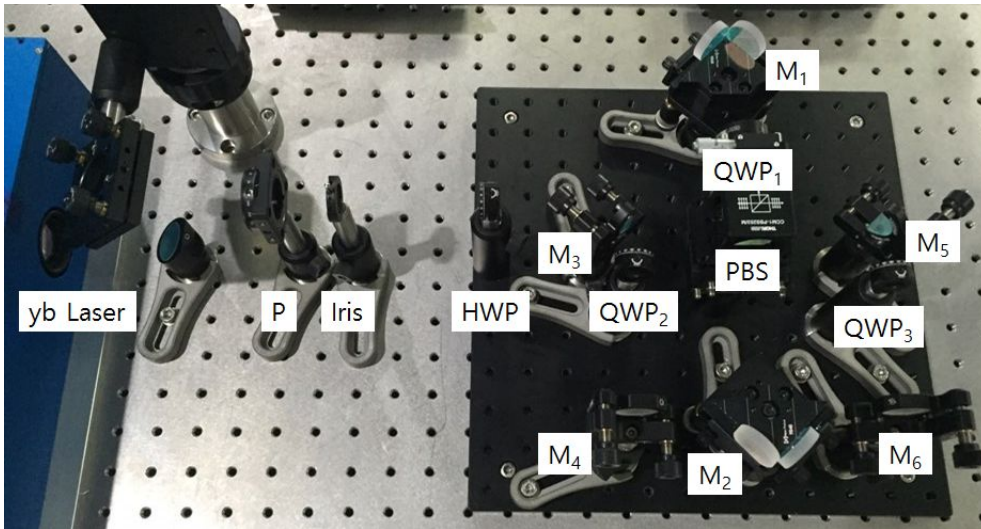


Fig. 3-2 실제로 구성된 다중 경로 간섭계 기반 가간섭 광 분할 시스템  
(yb-laser: yb-femtosecond laser, P: linear polarizer,  
HWP: half-wave plate, QWP: quarter-wave plate,  
PBS: polarizing beam splitter, M: mirror)

Table. 2 초소형 T-DPA 모듈 구성을 위한 광학 부품의 사양

Component	Specification
Yb-laser	Wavelength: 1042 nm 500 picosecond, 반복률 12.8 MHz
Polarizer	Wavelength: 650 - 2000 nm Transmission: > 84.5%
PBS	Wavelength: 900 - 1300 nm Transmission p-polarized: 90 % Reflectance s-polarized: 98 %
HWP	Wavelength: 1030 nm AR coated Transmission: 99.9 %
QWP	
Mirror	Reflectance: 99 %
D-shape mirror	Reflectance: 97 %
PD	Wavelength: 800 - 1700 nm Bandwidth: 5 GHz

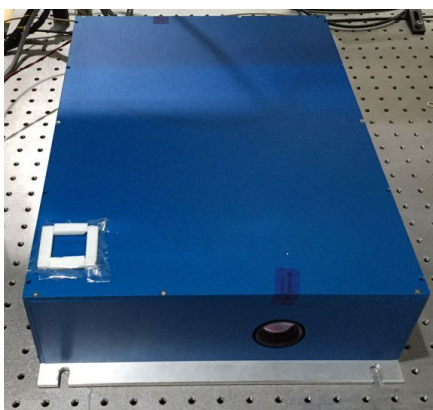


Fig. 3-3 가간섭 광 분할 시스템에 사용된 yb-femtosecond laser



Fig. 3-4 광 출력 측정 장치

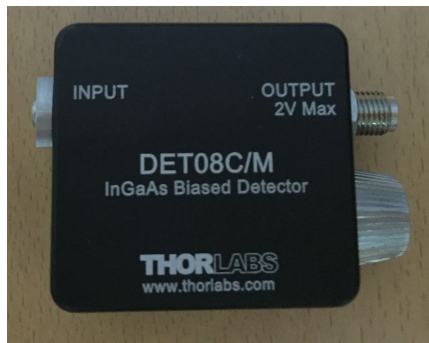


Fig. 3-5 분할 된 펄스를 검출하기 위한 광 검출기

Fig. 3-6은 초소형 T-DPA를 구성한 이후 시간 영역에서 분할 된 펄스들을 보여준다. Fig. 3-6 (a)는 이터븀 펄스초 레이저 내부의 오실레이터에서 측정된 펄스로, 레이저 자체에 내장되어 있는 광 검출기로 확인한 결과이다. 이때 뒤쪽에 보이는 작은 펄스들은 광원 자체가 가지고 있는 leakage 펄스로 추정된다. 한편, Fig. 3-6 (b)는 HWP의 각도를  $0^\circ$ 로 조절하여, PBS에서 투과하는 p-편광 상태의 펄스만을 생성한 경우를 보여준다. 반면, Fig. 3-6 (c)는 HWP의 각도를  $45^\circ$ 로 회전하였을 때, 초소형 T-DPA 모듈에 의한 시간 지연이 발생하는 s-편광 상태의 펄스만 생성한 경우를 나타내며, Fig. 3-6 (b)와 비교하여 펄스가 시간 지연되었음을 알 수 있다. Fig. 3-6 (d)는 HWP의 각도를 적절히 회전시켜 p-편광 및 s-편광 상태의 펄스 모두를 생성시킨 경우를 나타내며, 2개의 펄스 사이에 초소형 T-DPA 모듈의 광경로 차이에 의한 시간 지연이 발생함을 확인하였고, 이를 측정한 결과 6.1 ns였다. 본 실험을 통해 구성된 초소형 T-DPA를 이용하여 시간 영역에서 펄스가 분할됨을 확인하였고 2개의 펄스 사이에는

1.83 m의 광학적 경로 차이가 있음을 알 수 있었다.

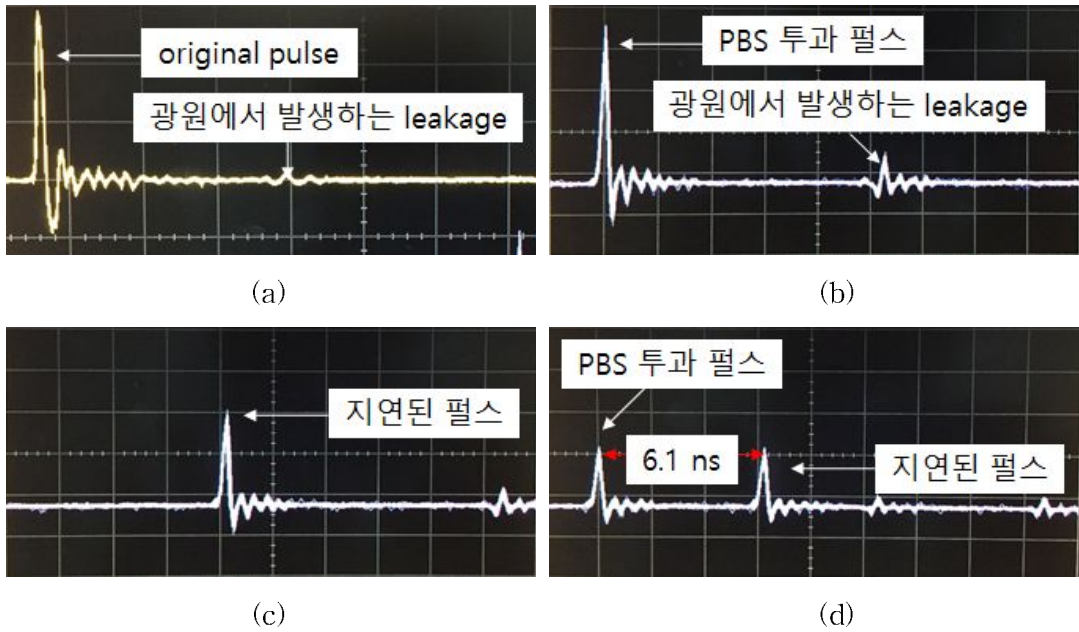


Fig. 3-6 분할 모듈 통과 결과 (a) 이터븀 펄스 레이저에서 나오는 펄스,  
 (b) 초소형 T-DPA 모듈을 투과한 펄스  
 (c) 초소형 T-DPA 모듈을 경험한 시간 지연된 펄스,  
 (d) HWP<sub>1</sub>을 조절을 통한 분할 된 펄스 열

## 제2절 펄스 결합 제어 기초실험

### (1) LOCSET 방법 및 PID 제어 실험 및 결과

초소형 T-DPA 모듈에서 분할한 펄스를 결합하기 위해서 본 논문에서는 Fig. 3-7과 같은 간단한 마이켈슨 간섭계를 구성하여 변조 / 복조 기술에 기반한 LOCSET 방법의 기초 제어 실험을 수행하였고 LOCSET 방법을 구현하기 위해 lock-in-amplifier를 사용하였다. lock-in-amplifier는 위상 민감 검출 (phase sensitive detection)을 이용하여 잡음 (noise)이 심한 환경에서 원하는 신호만을 정확히 얻어낼 수 있는 특징을 가진다. 이는 위상 민감 검출 방법에서 변조 및 복조를 통해 측정 신호와 잡음을 분리하고, 이를 제거하는 기능을 사용할 수 있기 때문이다. 본 실험에서는 lock-in-amplifier의 이러한 위상 민감 검출 방법을 통해 획득되는 제어 신호 (control signal)를 이용하여, 마이켈슨 간섭계 상에서 보강 간섭을 유지시키기 위한 LOCSET 방법의 기초실험을 수행하였다. 이때 lock-in-amplifier의 제어 신호는 PID 제어기를 통해 간섭계에 사용된 PZT의 입력 신호로 사용되었다.

마이켈슨 간섭계는 Table. 3에 정리된 광학 부품들을 사용하여 구성되었으며, 간섭 신호는 BS에서 광을 분리하고 각 경로를 겪은 두 광이 다시 BS에서 결합되도록 각 부품들을 정렬하였다. 기초실험에 사용된 레이저 다이오드 (Laser Diode, LD)는 638 nm 중심 파장에서 20 nm의 파장 대역을 가지며 평균 출력으로 14 mW를 갖는 Thorlabs사의 MCLS1-638을 사용하였다. 광 검출기로는 실리콘 소자로 만들어진 Thorlabs사의 DET36A/M을 사용하였으며, lock-in-amplifier는 Stanford Research System사의 SR830 모델을, PID controller (SIM 960) 및 summing amp (SIM 980) 역시 Stanford Research System사 제품을 사용하였다. 한편, 간섭계에서 광경로를 변조하는 용도 및 광경로의 변화를 주기 위한 구동 장치로는 PI사의 PZT (piezoelectric transducer)를 사용하였다.

Fig. 3-12는 기초실험에 사용된 LOCSET 제어 방법의 모식도를 나타낸다. 간섭 신호는 간섭계의 mirror들,  $M_1$ 과  $M_2$ 에서 반사한 광들이 BS에서 다시 결합하여서 발생하는데, 이때  $M_1$ 에 구성된 PZT<sub>1</sub>에 참조 신호를 인가하면 신호가 변조되면서 변조된 간섭 신호가 획득된다. 이때, PZT<sub>2</sub>는 전체적인 가간섭 거리를 맞추어주기 위한 용도 및 광경로를 스캔하기 위한 용도로 사용된다. PZT<sub>2</sub>에 의한 광 경로 스캔을 통해 광 검출기에서 검출되는 간섭 신호는 Fig. 3-13의 상단의 노란색의 그래프와 같다. 참고로 간섭 신호에서 변조 신호는 그 크기가 작아서 Fig. 3-13에서 확인이 어렵다. 한편, 변조

된 간섭 신호는 lock-in-amplifier로 입력되어 lock-in-amplifier에 내장 되어 있는 참조 신호와 내부에 있는 mixer에 의해서 결합되고, 저역 통과 필터 (low-pass filter)를 통과하면서 복조되어, 결과적으로 Fig. 3-13 하단의 파란색 그래프와 같은 제어 신호를 생성시킨다. 이 제어신호는 PID controller와 가산 증폭기 (summing amplifier)를 통해 참조 신호와 함께 PZT<sub>1</sub>에 피드백되어, 간섭계의 보강 간섭이 유지되도록 제어가 수행된다.

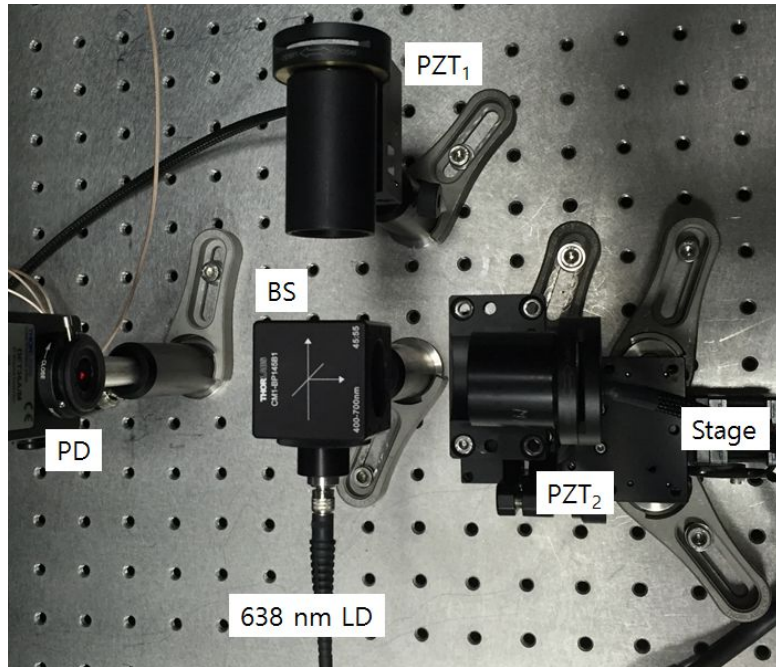


Fig. 3-7 펄스 결합 제어 기초실험 구성  
 (LD: 638 nm laser diode, BS: 50:50 beam splitter,  
 PZT: piezo driven mirror stage, PD: photodetector)



Table. 3 펄스 결합 제어 기초실험 구성을 위한 광학 부품의 사양

Component	Specification
LD source	Wavelength: 638 nm, FWHM: 20 nm ASE Power: 14 mW
BS	Wavelength: 400 - 700 nm Reflectance < 0.5 % , 50:50
Mirror	Wavelength: 400 - 750 nm Reflectance: 99%
PZT	Moving distance : 0 - 100 $\mu$ m 5th order polynomials
PD	Wavelength: 350 - 1100 nm, Rise time: 14 ns

Fig. 3-13은 오실로스코프에서 획득한 간섭 신호와 제어 신호를 나타낸다. 간섭 신호와 제어 신호를 살펴보면 간섭 신호가 최대일 때, 제어 신호가 0인 것을 확인할 수 있으며, 간섭 신호가 최대 지점에서 벗어남에 따라 제어 신호는 선형적인 응답임을 알 수 있다. 이때 사용된 lock-in-amplifier에서 10 ms의 time constant와 50 mV의 sensitivity를 사용하였고, 참조 신호로 진폭은 2.5 V와 주파수는 35 Hz를 사용하였다. Fig. 3-14는 LOCSET 방법을 이용하여 제어하기 이전과 이후에 대한 간섭 신호의 크기를 나타낸다. 제어를 하지 않을 때의 간섭 신호는 외란에 의해 시간에 따라 변화하는 양상을 보이지만, 제어가 동작한 이후에는, 두 광이 보강간섭을 유지하면서 간섭 신호가 최대가 됨을 알 수 있다. 제어 전, 간섭 신호의 변화에 있어 최소는 0.4522, 최대 1.209였으며, 전체 0.7568변화량에 대해서 제어 이후의 변화량은  $\pm 0.0025$ 로 측정되어, 구성한 LOCSET 방법의 안정도는  $6.6 \times 10^{-3}$ 임을 확인하였다.



Fig. 3-8 기초 제어 실험에 사용된 광원

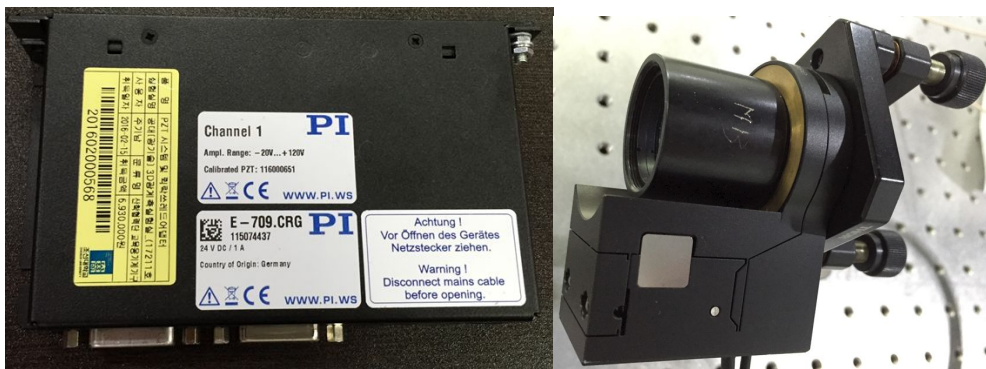


Fig. 3-9 기초 제어 실험에 사용된 PZT 및 PZT 제어기



Fig. 3-10 LOCSET 방법에 사용된 lock-in-amplifier



Fig. 3-11 LOCSET 방법에 사용된 PID control 및 summing amp

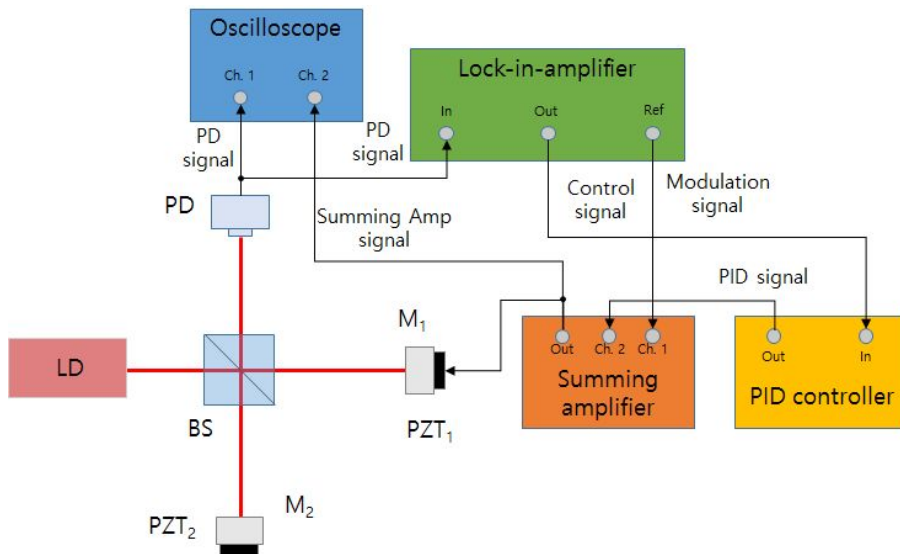


Fig. 3-12 LOCSET 제어 방법의 모식도

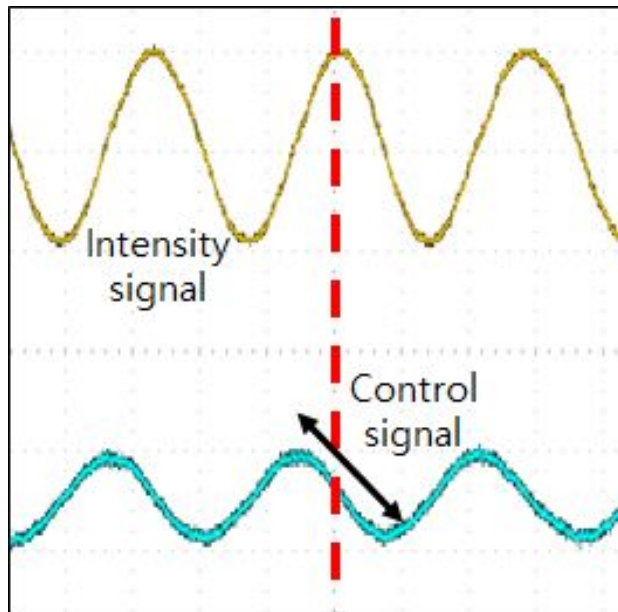


Fig. 3-13 광 검출기 신호와 위상 오류 신호 결과

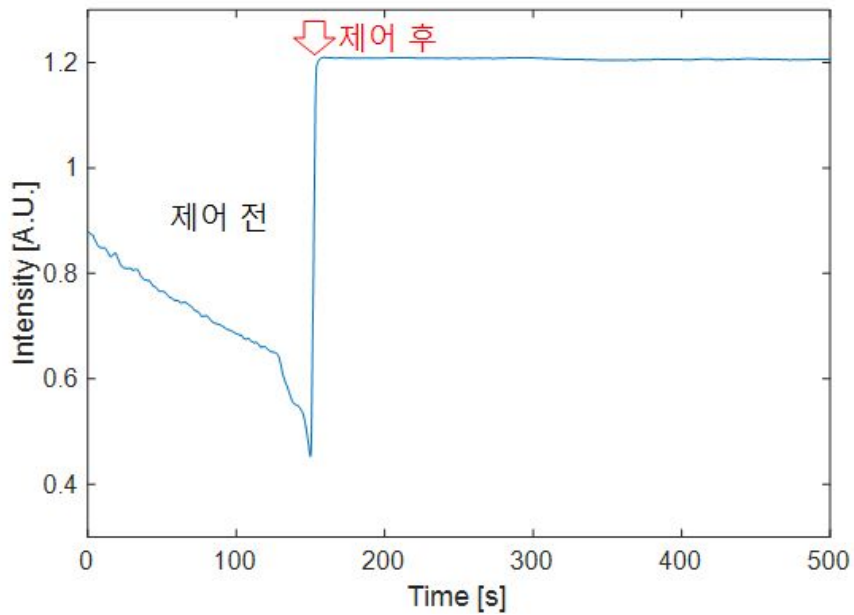


Fig. 3-14 PID 제어 전과 제어 후의 결과

### 제3절 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합

#### (1) 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합

기본적으로 분할된 펄스를 결합하기 위해서는 분할기와 광학적 경로가 같은 결합기가 필요하다. 그렇기 때문에 전체적인 분할 펄스 증폭 모듈은 더욱 커질 수밖에 없고, 이는 산업계의 응용을 위해 소형화에 중점을 두는 본 연구의 목표와 차이가 있다. 그래서 본 논문에서는 분할 모듈과 결합 모듈을 통합하여 초소형 T-DPA 모듈의 전체적인 크기를 줄임으로써, 분할 펄스 증폭 모듈의 소형화를 제안하고, 안정적인 가간섭 펄스 결합을 가능하게 하였다.

Fig. 3-15는 Fig. 3-1의 펄스 분할 모듈에 가간섭 펄스 결합 모듈을 결합한 광학 구성을 나타낸다. 펄스 분할 모듈에서 분할된 펄스들은 펄스 결합을 위한  $M_7$ 을 사용하여 모듈의 하단의 경로로 모듈에 입사하게 된다. 하지만 분할된 펄스가 그대로 다시 모듈에 입사하게 되면, 상단의 경로에서 투과했던 p-편광 상태의 펄스광은 다시 투과하고 반사해서 경로를 통과했던 s-편광 상태의 펄스광 역시 하단의 경로를 통과하게 된다. 그렇기 때문에  $45^\circ$  회전된  $HWP_2$ 를 하단 경로에 두어 서로 편광 방향을 바꿔준다. 이에 s-편광 상태의 펄스는 p-편광으로, p-편광 상태의 펄스는 s-편광으로 바뀐다. 그러면 두 편광 상태의 펄스들은 서로 반대의 경로를 겪으면서 초소형 T-DPA 모듈을 통과하여 결합이 가능해진다.

기본적으로 Fig. 3-15와 같은 펄스 분할/결합 모듈은 상단의 광경로차와 하단의 광경로차가 같은 광학계를 사용하기 때문에 동일해야 한다. 하지만 광학계의 정렬상 두 광경로차는 정확히 일치하지 않으며, 결합하는 2개의 펄스 간 위상차가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 모듈에서 결합되는 하단의 펄스 경로에  $M_8$ 을 설치하여  $M_9$ 이 부착된 PZT를 통해 광경로를 조절할 수 있도록 구성하였다. 그러면 펄스가 분할할 때의 간섭계와 결합할 때의 간섭계에서는 전체적으로 녹색 영역과 같은 차이를 보이게 되며, 두 간섭계에서 발생하는 광경로차를 동일하게 하기 위해 LOCSET 방법을 이용하여 제어가 수행된다.

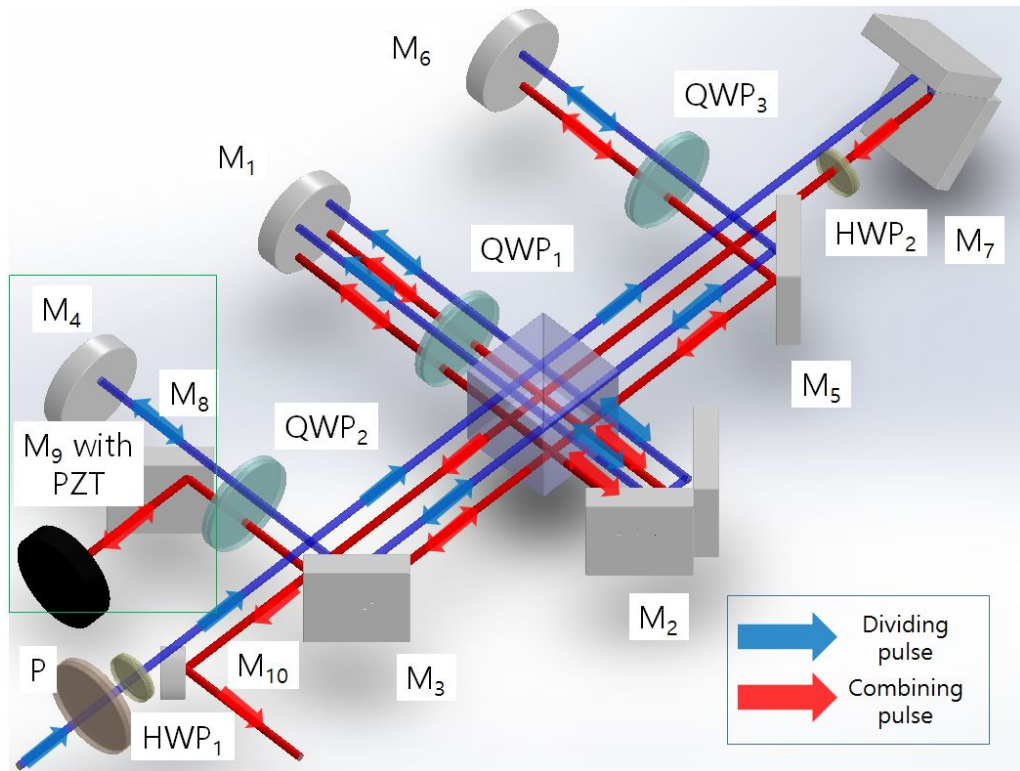


Fig. 3-15 통합된 초소형 T-DPA 모듈의 설계 및 광경로

## (2) 초소형 T-DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합 제어 및 결과

Fig. 3-16은 초소형 T-DPA 모듈을 실제로 제작한 모습을 보여준다. 사용된 광학 부품들의 위치는 3장 1절에서 구현한 초소형 T-DPA 모듈과 비교하여 큰 변화가 없으며, 단지 결합을 위해 반사하여 되돌아오는 광을 막지 않도록 정렬 상태를 수정하였다. 또한, 이터븀 레이저의 자체 출력의 변화를 확인하기 위해 앞단에 BS<sub>1</sub>을 설치하여 반사광을 광검출기로 획득함으로써 확인하였다. 또한, 행정 거리가 비교적 긴 수동 스테이지를 이용하여 전체적인 광경로를 조절하였으며, PZT를 이용하여 광펄스를 변조함과 동시에 LOCSET 제어를 통해 가간섭 펄스 결합을 수행하였다. 본 연구에서 구성한 초소형 T-DPA에서는 최종적으로 M<sub>10</sub>을 통과하고 나온 펄스들이 P<sub>2</sub>에 의해 간섭 신호를 발생시키고, 이 간섭 신호를 고속 광검출기에서 획득하여 LOCSET 제어에 사용하였다.

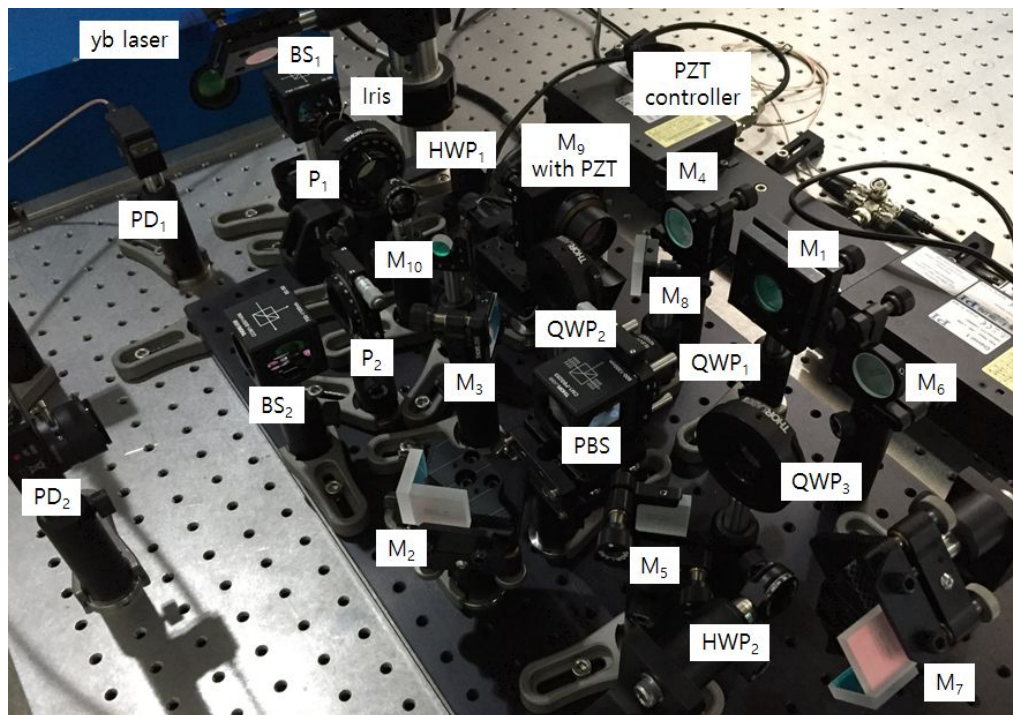


Fig. 3-16 실제로 구성된 펄스 분할 결합 모듈  
 (yb-laser: yb-femtosecond laser, P: linear polarizer,  
 HWP: half-wave plate, QWP: quarter-wave plate,  
 PBS: polarizing beam splitter, M: mirror  
 BS: beam splitter, PD: photodetector)

Table. 4 통합 분할 결합 모듈의 구성을 위한 광학 부품의 사양

Component	Specification
Yb-laser	Wavelength: 1042 nm 500 picosecond, 반복률 12.8 MHz
Polarizer	Wavelength: 650 - 2000 nm Transmission: > 84.5%
PBS	Wavelength: 900 - 1300 nm Transmission p-polarized: 97.8% at 1042 nm Reflectance s-polarized: 99.8% at 1042 nm
HWP	Wavelength: 1030 nm AR coated Transmission: 99.9% at 1042 nm
QWP	
Mirror	Reflectance: 99 %
PZT	Moving distance : 0 - 100 $\mu\text{m}$ 5th order polynomials
PD	Wavelength: 800 - 1700 nm Bandwidth: 5 GHz

가간섭 펄스 결합을 위해 먼저 시간 지연된 펄스들 사이의 간섭 구간을 수동 스테이지를 이용하여 검색하였고, Fig. 3-17과 같이 2개의 펄스 간의 간섭 신호가 발생하는 구간을 확인하였다. 간섭 구간에서 간섭 신호가 최대가 되는 지점으로 스테이지를 이동시킨 후, LOCSET 방법을 적용하여, Fig. 3-18과 같이 간섭 신호의 변화에 따른 제어 신호를 획득하였다. 이후, 제어 신호를 PID 제어기를 통해 PZT에 feedback한 결과, Fig. 3-19와 같이 가간섭 펄스 결합이 이루어졌음을 확인하였다. 제어 전에는 간섭 신호가 외부 환경에 의해 변화하다가 제어 후 보강간섭이 유지됨을 알 수 있고, 이때 제어 전 상태의 광 검출기의 전체 세기 변화량 0.4088에 대해 제어 후  $\pm 0.0065$ 의 변화량을 보여 안정도는  $3.18 \times 10^{-2}$ 를 가졌다. LOCSET의 기초실험에서 얻은 안정도에 비해 비교적 안정도가 저하되었음을 확인하였고, 그 이유는 기초실험에 비해 광학계 구성이 복잡하고, 광경로가 비교적 길기 때문으로 판단된다.

한편, 구성된 T-DPA의 장시간 안정도를 평가하기 위해 대략 13시간 동안 제어를 수행하였으며 그 결과, Fig. 3-20 (a)와 같이 간섭 신호가 시간에 따라 변화하고 있음을 확인하였다. 이는 제어가 제대로 작동하지 않아서 발생한 문제라기보다는 사용하는 펄스 레이저의 출력이 시간에 따라 변화하기 때문으로 파악되었다. 실제로 Fig.



3-20 (b)는 같은 시간 동안에 측정된 레이저 자체의 출력 변화를 나타내며, 레이저의 출력 변화가 Fig. 3-20의 (a)와 같은 간섭 신호 변화 양상이 같음을 알 수 있다. 그래서 이러한 레이저 자체의 출력 변화를 제거하고 난 이후에 간섭 신호의 변화량을 살펴본 결과, Fig. 3-20 (c)와 같이 장시간에도 LOCSET 제어를 통해 보강 간섭을 유지하고 있음을 확인하였다.

최종적으로 구성된 초소형 T-DPA의 펄스 결합 안정도를 정량적으로 평가하기 위해 알란 편차값 (Allan deviation)을 계산하였다. 알란 편차값은 integration time에 따라서 흔들리는 신호의 안정도를 평가하는 방법으로 Fig. 3-20의 결과들에 대한 알란 편차값을 계산한 결과 Fig. 3-21과 같은 안정도를 얻었다. 레이저 자체 출력 변화량을 보상하지 않은 경우, 간섭 신호의 안정도는 integration time이 1 s일 때  $2.97 \times 10^{-2}$ 를 가지며 integration time이 증가함에 따라 점차 높은 안정도를 갖는다. 그러나 일정 수준 이상에서는 안정도가 저하되는 현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 것과 같이 장시간 동안 간섭 신호가 변화하는 현상에 의해 발생하는 것과 같다. 한편, 레이저 자체 출력의 안정도 역시 간섭 신호의 안정도와 비슷한 양상을 보인다. 그러나 레이저 자체 출력 변화를 보정한 간섭 신호의 경우에는 integration time이 증가함에 따라 이러한 안정도 저하가 발생하지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서는 초소형 T-DPA 모듈을 설계, 제작하여 펨토초 펄스에 대한 시간 영역의 분할과 결합 실험하였으며, LOCSET 제어를 통해 간섭 신호 기준  $2.97 \times 10^{-2}$ (1 s.),  $1.31 \times 10^{-2}$ (10 s.),  $7.99 \times 10^{-3}$ (100 s.)의 안정도를 확인하였다. 또한, 펄스의 결합 출력은 1.25 mW로 결합 효율은 약 46 %로 측정되었으며, 이론적으로 계산한 결합 효율과 일치함을 확인하였다.

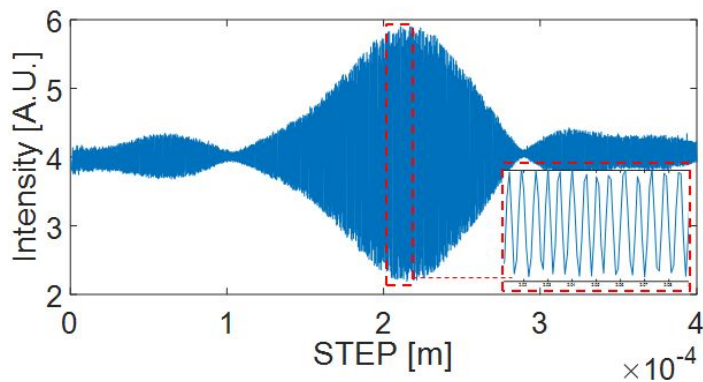


Fig. 3-17 두 가간섭 펄스 결합의 간섭 신호 결과

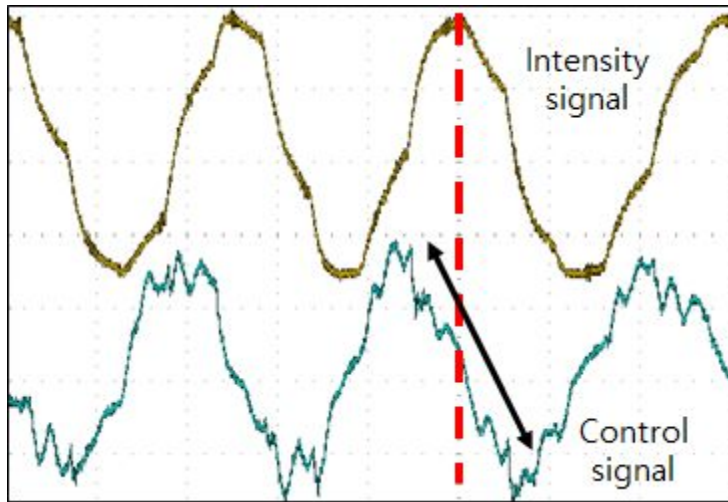


Fig. 3-18 LOCSET 방법을 통한 제어 신호 결과

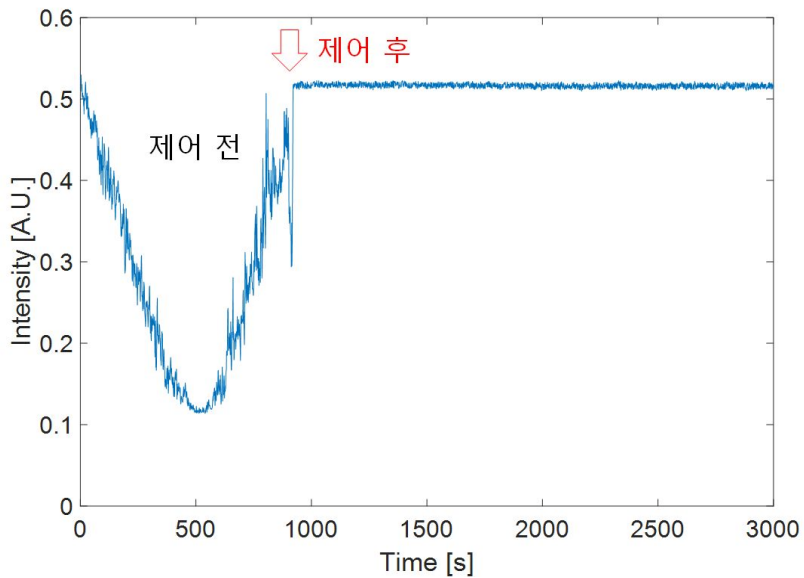
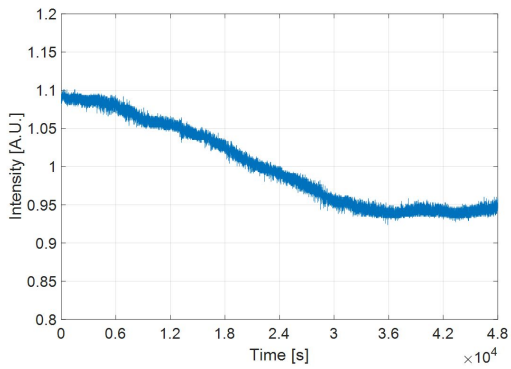
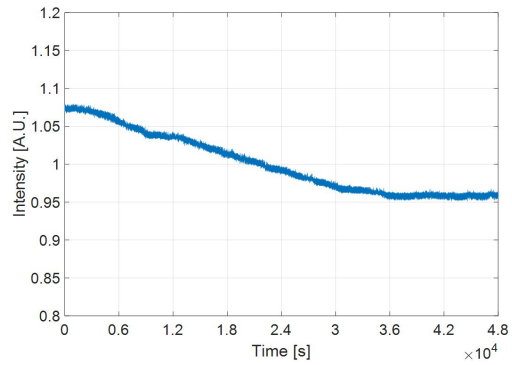


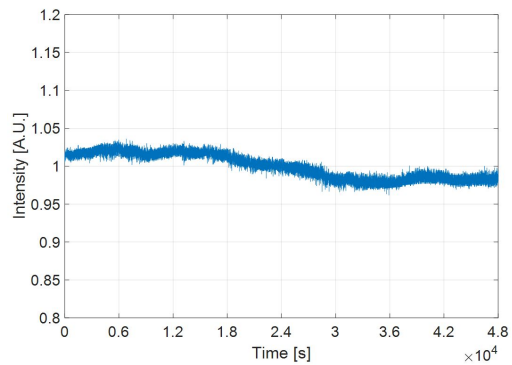
Fig. 3-19 단시간 가간섭 펄스 결합의 PID 제어 결과



(a)



(b)



(c)

Fig. 3-20 장시간 가간섭 펄스 결합의 PID 제어 후 세기 변화

(a) 제어가 된 간섭 신호, (b) 사용된 광원의 신호, (c) 광원의 신호로 보상한 후의 제어가 된 간섭 신호

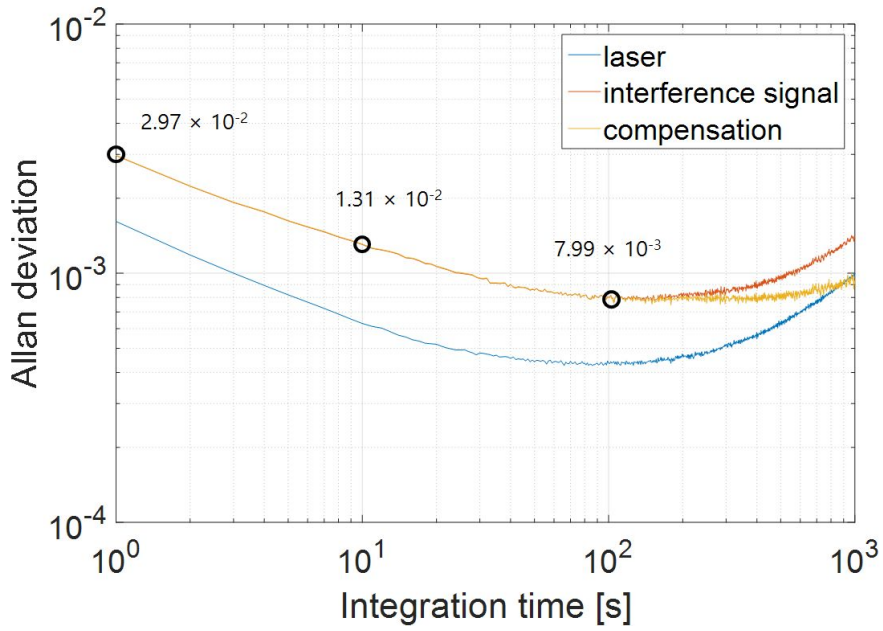


Fig. 3-21 PID 제어의 Allan deviation을 통한 안정도 평가

## 제4장 고찰 및 논의

### (1) 다중 경로 간섭계 기반 가간섭 펄스 결합 모듈

시간 영역에서 분할 펄스 증폭 기술을 구현하기 위한 기존의 간섭계 기반 연구들은 간섭계의 크기가 m급 이상으로 소형화가 어려운 한계를 가지고 있다. 한편, 본 연구에서 제안하는 다중 경로 간섭계 기반의 분할 펄스 모듈은 6.1 ns 시간 지연을 달성하기 위해 비교적 작은 크기인 0.35 m × 0.35 m로 설계되었다. 또한, 펄스 결합을 위해 광학적 경로 길이가 같은 간섭계를 추가적으로 구성하는 타 연구에 비하여 본 논문에서는 펄스 분할과 결합을 동시에 구성할 수 있는 모듈을 제안하였다. 그러나 동시에 펄스들이 많은 광학 부품들을 통과하면서 출력이 저하되는 문제가 발생하였다. 특히 PBS의 투과율이 90 % 정도인 관계로, 이를 통과하는 펄스들의 광세기가 현저히 저하됨을 확인하였다. 그래서 최종적으로 계산된 펄스 결합의 효율은 46 % 정도로 본 연구에서 제안한 초소형 T-DPA 모듈을 상용화하기 위해서는 이러한 한계를 극복해야 한다. 전체 광학 구성에 있어 광세기를 저하시키는 가장 큰 요인은 PBS의 투과율 및 반사율이다. 본 연구에서는 프리즘 형태의 PBS를 사용하였는데, 대부분의 프리즘 PBS는 투과율 90 %, 반사율 98 %의 특성을 보이고 있다. 이를 개선하기 위해서는 투과율 및 반사율이 매우 높은 PBS가 필요하며, plate 형태의 PBS는 이러한 프리즘 형태에 비해서 더 높은 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 그래서 plate 형태의 PBS를 사용하면, 본 연구에서 제시한 결합 효율을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서는 광 증폭기를 고려하지 못했지만, 이후 광 증폭기의 효율을 고려하여 구성한 모듈의 효율을 계산하는 경우에는 모듈 자체의 결합 효율은 크게 문제가 되지 않을 것으로 생각된다.

한편, 본 연구에서는 초소형 T-DPA 모듈을 입사하기 전의 펄스와 통과하고 난 이후의 펄스에 대한 특성 분석이 원활히 이루어지지 않았다. 이를 위해서는 기본적으로 자체상관기 (autocorrelator)를 이용하여 펄스폭 측정이 수행되어야 한다. 그러나 본 논문에서는 초소형 T-DPA 모듈을 제안하고 이를 검증하는 연구에 초점이 맞추어져 있으므로, 증폭 이전과 이후의 펄스의 특성 분석 연구는 향후 증폭기의 구성이 이루어진 이후에 진행될 수 있을 것으로 생각된다.

## (2) 모듈의 제어 안정도 평가

본 논문에서는 다중 경로 간섭계의 위상과 광경로 차이를 잠금하기 위한 방법으로 LOCSET 방법을 사용하였다. 실제로 제어한 결과, 구성된 초소형 T-DPA 모듈의 보강간섭 상태에서 제어 신호를 얻어 PID 제어를 했음에도 불구하고 출력이 큰 폭으로 줄어들다가 안정되었다. 이는 레이저 자체의 출력이 심하게 흔들려 발생하는 현상으로 레이저 자체의 떨리는 출력으로 가간섭 펄스 결합의 제어량을 보성한 결과 비교적 양호한 안정도를 보였으나 여전히 불안정한 모습을 보였다. 그래서 효과적인 펄스의 분할 및 결합에 있어서 사용하는 레이저의 출력의 안정화가 필요하며 동시에 외부적인 환경 요소의 제어가 필수적이다.

한편, 현재 구성된 초소형 T-DPA 모듈은 사용하는 PZT의 대역폭이 상대적으로 매우 낮아 환경 변화에 빠르게 대처하지 못하는 한계를 가진다. 이는 PZT에 거울 및 마운트 등이 부착됨에 따라 PZT의 공명 주파수가 낮아 졌기 때문으로 생각된다. 이를 해결하기 위해 비교적 높은 대역폭의 PZT 사용이 필요하며, 부착되는 거울 및 마운트의 무게를 줄이는 설계가 필요하다.

## (3) 증폭기의 추가 구성

본 논문에서는 증폭기를 구성하지 않은 상태에서 펄스를 분할하고 결합하였다. 그러나 제안된 모듈에서 향후 증폭기를 시간적 또는 공간적으로 추가 구성하는 것이 가능하다. 이는 현재 구성된 Fig. 3-16의  $M_7$  위치에 증폭기를 구성하고 증폭된 펄스들을  $M_7$ 의 결과와 동일하게 모듈에 입사시키게 되면 간단히 증폭기와 본 연구에서 제안한 모듈을 함께 구성할 수 있다. 다른 한편으로는 Fig. 2-2와 같은 간단한 마하젠더 간섭계를 구성하여, 시간적으로 분할된 펄스들은 다시 공간적으로 분할하여 4개의 펄스 생성이 가능해진다. 이후 각각의 공간에서 광 증폭기를 통과한 후, 공간적으로 결합한 이후에 구성한 초소형 T-DPA의 결합 경로로 입사하게 되면, 전체 4채널의 증폭된 펄스들의 결합을 통해 높은 에너지의 펄스 생성이 가능해진다. 비록, 초소형 T-DPA 모듈을 단독으로 사용하는 것보다 증폭기를 포함한 S-DPA 모듈을 함께 구성하는 경우, 전체 시스템은 S-DPA 모듈만큼 늘어나지만 더 높은 출력의 펄스를 생성할 수 있다는 점에서 의미를 가진다.

## 제5장 결론

본 논문에서는 펄스 증폭기의 펄스를 고풍출력의 펄스로 증폭시키기 위한 방법으로 가간섭 펄스 결합을 기반으로 한 분할 펄스 증폭 방법 (DPA)에 대한 연구를 수행하였다. 현재까지 연구된 분할 펄스 증폭 방법의 경우, 간섭계를 기반으로 연구적인 측면에서 고풍출력의 안정적인 펄스를 얻는 연구가 국외에서 활발하게 진행되었다. 하지만 기존의 연구들은 간섭계를 기반으로 하고 있어, 시간 영역에서 펄스를 분할하기 위해서는 비교적 시스템이 커지는 문제가 발생하였다. 이에 본 논문에서는 동일한 시간 지연 효과를 가지지만, 다중 경로 간섭계 기반으로 초소형 T-DPA 모듈을 설계, 제작하였다. 또한, 펄스 분할과 결합을 동시에 수행할 수 있는 모듈을 제안함으로써 전체 시스템의 크기를 현저히 줄였다. 이때 광원의 입력 펄스와 결합된 펄스의 출력은 각각 2.84 mW 와 1.25 mW로, 모듈의 결합 효율은 약 46 %였다.

또한 제안한 모듈에서 가간섭 펄스 결합을 수행하기 위해 LOCSET 방법을 도입하였다. LOCSET 제어를 얻기 위해 먼저 초소형 T-DPA 모듈의 서로 다른 광 경로를 겪은 두 펄스의 간섭 신호를 획득하였으며, 보강간섭 구간을 기준으로 제어 신호를 획득하여 제어를 수행하였다. 장시간 PID 제어를 통해 가간섭 펄스 결합을 확인한 결과 레이저의 출력 저하에 의해 간섭 신호의 광세기가 변화하는 양상을 보였으나 이를 보상하면 긴 시간에서도 안정적으로 가간섭 펄스 결합이 유지됨을 확인하였다. 초소형 T-DPA 모듈의 안정도를 평가하기 위해, Allan deviation을 측정하였으며 integration time이 1초에서  $2.97 \times 10^{-2}$ 의 안정도를 가짐을 확인하였고 integration time이 증가함에 따라 안정도는 더욱 높아짐을 확인하였다. 본 연구에서는 초소형 T-DPA의 설계 및 제작에 초점을 맞추어 진행되었기 때문에, 광 증폭기를 함께 구성하지 않아 전체 증폭기에 대한 특성 분석 등의 연구가 수행되지는 않았으나 향후 본 연구의 결과를 토대로 초소형 T-DPA에 대한 연구가 활발히 진행될 것으로 판단된다.

## 【참고문헌】

- [1] 오용석, “연속파형 파이버 레이저를 이용한 자동차 철강소재의 용접 및 절단 특성에 관한 연구”, 박사학위논문, 조선대학교 (2013)
- [2] 허정우, “피코초 레이저를 이용한 평판디스플레이용 유리기판의 가공특성“ 석사학위논문, 한양대학교 (2010)
- [3] Franz X. Kartner, “Femtosecond laser development”, springer (2005)
- [4] D. strickland and G. Mourou “Compression of amplified chirped optical pulses”, Opt. Commun. 56, 219 (1985)
- [5] J. Limpert et al., “High average power femtosecond fiber CPA system”, Opt. Lett. 28, 20 (2003)
- [6] C P J Barty, “The Nexawatt: A Strategy for Exawatt Peak Power Lasers Based on NIF and NIF-like Beam Line”, J. Phys 717, 012086 (2016)
- [7] T. Y. Fan, “Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources”, IEEE. 11, 3 (2005)
- [8] V. Daneu et al., “spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity”, Opt. Lett. 25, 6, 405 (2000)
- [9] E. J. Bochove, “Theory of spectral beam combining of fiber laser”, IEEE J. Quantum Electron. 38 (5), 432 (2002)
- [10] Xi Zhang, et al., “New method of incoherent beam combining for fiber laser based on concave grating”, Opt Las. 48, 353 (2012)
- [11] L. Liu et al., “Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths”, Appl. Phys. Lett. 85, 4837 (2004)
- [12] Marco Kienel et al., “Multidimensional coherent pulse addition of ultrashort laser pulses”, Opt. Lett. 40, 4, 522 (2015)
- [13] Youichi Bitou, “Phase-shifting interferometry with feedback control using heterodyne phase detection”, Opt. Lett. 33, 16, 1777 (2008)
- [14] Benjamin N.Pulford, “LOCSET Phase Locking : Operation Diagnostics, and Applications”, Dissertation, The University of New Mexico Albuquerque, New Mexico (2011)



- [15] Thomas M. Shay, “Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam”, Opt. Express 14, 25 (2006)
- [16] Shtan Zhou et al., “Divided-pulse amplification of ultrashort pulses”, Opt. Lett. 32, 7, 871 (2007)
- [17] Marco Kienel et al., “Analysis of passively combined divided-pulse amplification as an energy-scaling concept”. Opt. Express 21, 23 (2013)
- [18] Marco kienel et al., “Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification”, Opt. Lett. 39, 4, 1049 (2014)
- [19] BENJAMIN WEBB et al., “Divided-pulse amplification to the joule level”, Opt. Lett. 41, 13, 3109 (2016)
- [20] Eric Black, “Notes on the Pound-Drever-Hall technique.” Technical Note, LIGO Project (1998)
- [21] T. M. Shay et al., “First experimental demonstration of self synchronous phase locking of an optical array”, Opt. Express. 14, 25 (2006)