



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](#)

2019년 2월

석사학위논문

고출력 펄스 생성을 위한 다채널 가간섭 펄스 결합 연구

조선대학교 대학원

광기술훈학과

장진

고출력 펄스 생성을 위한 다채널 가간섭 펄스 결합 연구

Multi-channel coherent pulse combining for high power
pulse laser

2019년 02월 25일

조선대학교 대학원

광기술평학과

장진

고출력 펄스 생성을 위한 다채널 가간섭 펄스 결합 연구

지도교수 주 기 남

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

장 진

장진의 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)

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제1절 연구 배경	1
제2절 연구 현황	4
제3절 연구목표 및 내용	9
제2장 분할 펄스 증폭 기술을 이용한 가간섭 펄스 결합 모듈	10
제1절 고출력 레이저를 위한 펄스 증폭	10
1. 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리	10
1.1 시간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리	11
1.2 공간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리	13
제2절 레이저 펄스의 분할 및 결합 구성	15
1. 다중 경로 간섭계 기반의 분할 및 결합	15
2. 광섬유 기반의 펄스 분할 및 결합	18
3. 다중 경로 간섭계, 광섬유 기반의 펄스 분할 및 결합 비교 ..	19
제3절 레이저의 펄스 결합 모듈 안정화	20
1. 레이저의 가간섭 펄스 결합 조건	20
2. LOCSET 안정화 방법	20

제3장 실험 결과 및 분석	24
제1절 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈	25
1. 시간, 공간 영역의 가간섭 펄스 결합 모듈 설계 및 구성	25
2. LOCSET 방법 및 PID 제어 결과	33
제2절 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈	40
1. 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 구성	40
2. 광섬유 기반 모듈의 가간섭 펄스 결합 제어 및 결과	43
제4장 고찰 및 논의	46
제1절 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈	46
제2절 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈	47
제5장 결론	49
[참고문헌]	51

그림 목차

그림 1.1	초프 펄스 증폭 (CPA) 원리	3
그림 1.2	고출력 레이저를 구성하기 위한 광 결합 방법	6
그림 1.3	펄스 레이저의 시간-공간 영역의 가간섭 펄스 결합에 대한 선행 연구	7
그림 2.1	분할 펄스 증폭의 개념	10
그림 2.2	(a) T-DPA의 기본 구성도, (b) T-DPA에서 분할 된 증폭 펄스 결합 구성도	12
그림 2.3	S-DPA의 기본 구성도	13
그림 2.4	다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈 구성도	17
그림 2.5	광 증폭기 (Yb doped fiber amplifier)의 구성도	17
그림 2.6	광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 구성도	18
그림 2.7	LOCSET 방법의 구성도	21
그림 2.8	LOCSET 방법의 개략도	21
그림 3.1	다중 경로 간섭계를 이용한 DPA 모듈 설계	25
그림 3.2	실제로 구성된 다중 경로 간섭계 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈	27
그림 3.3	다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에 사용된 Yb-femtosecond laser	29
그림 3.4	광출력 측정 장치	29
그림 3.5	펄스를 검출하기 위한 광 검출기	29
그림 3.6	시간 분할 모듈 통과한 결과	30
그림 3.7	공간 분할 모듈 통과한 결과	31
그림 3.8	본 연구에서 사용한 광 증폭기의 모습 및 성능 사양	32
그림 3.9	간섭 신호를 검출하기 위한 광 검출기	35
그림 3.10	LOCSET 제어에 사용한 lock-in-amplifier	35

그림 3.11 본 연구에서 사용한 PZT 및 PZT 제어기	35
그림 3.12 LOCSET 제어에 사용한 PID controller 및 summing amplifier	36
그림 3.13 LOCSET 제어 방법의 개략도	36
그림 3.14 간섭 신호 및 제어 신호의 결과	37
그림 3.15 가간섭 펄스 분할 및 결합	37
그림 3.16 PID 제어 전과 제어 후의 결과	38
그림 3.17 DPA 모듈의 Allan deviation을 통한 가간섭 제어의 안정도 평가	38
그림 3.18 실제로 구성된 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈	41
그림 3.19 간섭 신호 및 제어 신호의 결과	44
그림 3.20 PID 제어 전과 제어 후의 결과	45
그림 3.21 PID 제어의 Allan deviation을 통한 안정도 평가	45
그림 4.1 EOM과 R-PZT가 추가된 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 구성도	48

표 목차

표 1. 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈 구성을 위한 광학 부품의 사양	28
표 2. 다중 경로 간섭계 기반의 가간섭 결합 모듈의 펄스 결합 효율 측정 결과	39
표 3. 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 구성을 위한 광학 부품의 사양	42

ABSTRACT

Multi-channel coherent pulse combining for high power pulse

By Jin Jang

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

Department of Photonic Engineering
Graduate School of Chosun University

Since the development of a Ruby ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$) laser in 1960, manifold researches for several types of lasers and increasing the output of lasers have been continuously investigated, and their application fields have been also expanded in science and industry. Recently, ultrashort pulse lasers have been noticeable as new optical sources in several research fields such as frequency metrology, dimensional metrology and laser physics. They also have been attractive to industrial precise machining, observation of instantaneous natural phenomena, generation of high harmonics for extremely short light waves and even laser induced nuclear fusion. Although each research field requires the specific demands such as pulse duration, repetition frequency of the pulse train and center wavelength, the common feature for their fulfilled conditions is definitely the high peak power or the high pulse energy.

The typical amplification method for ultrashort pulse lasers is the chirped pulse amplification (CPA), which stretches the pulse to lower the peak power under the damage threshold level of the amplifying medium, increases the pulse energy and compresses the chirped pulse into the original ultrashort pulse. This conventional method has been widely used in high peak power femtosecond pulse lasers because of its robustness and well-developed techniques. However, the single CPA still has

practical limitations in the view of safety if it is applied to high power lasers due to much heat generation. Furthermore, the amplifying medium and optics should be specially designed in order to avoid damage issues in the single CPA process.

An efficient way to overcome the limitations of the single CPA is the divided chirped pulse amplification (DPA), which divides the chirped pulse into several sub-pulses, amplifies each pulse and combines the amplified sub-pulses as a single pulse. In the DPA process, the sub-pulses do not have to be amplified much strongly, which indicates the heat generation and damage issues can be mitigated compared to the single CPA process. The DPA can be categorized into two, temporal DPA (T-DPA) and spatial DPA (S-DPA), by the pulse division domain. In the T-DPA, the seed pulse is divided by time-delay lines and the coaxial sub-pulses can be generated with time intervals. These timely distributed sub-pulses are amplified by the same amplifying medium with the specific time difference and they are recombined with the coherent pulse combining technique. The main advantage of T-DPA is the efficiency enhancement of the amplifier to increase the output power. On the other hand, S-DPA spatially divides the seed pulse and the sub-pulses are amplified by each optical amplifier. Then, the output pulse can be generated by the coherent pulse combining and S-DPA can have the benefit to unite all amplification effects. The overall DPA combines these two principles in the single configuration and it can effectively obtain ultrashort high peak power and energy pulses with the aid of pulse compression.

The most important issue in DPA is to completely combine the sub-pulses into the single pulse, which means the sub-pulses should be coherently combined as the constructive interference. If the sub-pulses are not overlapped with respect to perfectly constructive interference, the output pulse does not have high peak power and short pulse duration. Even, the pulse combining should be stabilized to obtain reliable experimental results in aforementioned research and industrial fields. Another subject considered in DPA is the size of realized optical configuration because most of previous researches has been implemented in laboratory and they have impractical limitation in size.

In this investigation, we propose a miniaturized DPA module which divides,

amplifies, and combines pulses temporally and spatially for industrial applications. Especially, the proposed T-DPA module has effectively long optical time delay line, which leads to a few ns delay time, because of the multi-path interferometric scheme and the single module can act a role of both dividing and combining pulses.

The whole system consists of 3 parts; temporal pulse divider/combiner (T-DPA module), spatial pulse divider/combiner (S-DPA module) and pulse amplifiers. The seed pulse is incident to the T-DPA module and the pulse is temporally divided by multi-path interferometric principle. The temporal pulse train is then incident to the S-DPA module and it is divided into two pulse trains by the polarization state of pulses. These pulse trains go through pulse amplifiers and return back to the S-DPA and T-DPA modules. The amplified pulses are recombined in the system by the reverse operations of temporal and spatial division procedures and the single pulse with high energy is generated. To combine the divided pulses, the locking of optical coherent via single-detector electronic-frequency tagging (LOCSET) method based on modulation and demodulation techniques was used. The LOCSET method obtained the control signal based on the interference signal and it was feedback to the piezoelectric transducer (PZT) attached to a mirror through PID loop. In order to estimate the stability of pulse combining, the intensity signals were collected for approximately 13 hours and Allan deviation was calculated. As the result, the stability of pulse combining was 2.97×10^{-2} at 1 s integration time.

In the experiments, however, the ytterbium doped fiber amplifiers (YDFAs) were used for the pulse amplification and the coupling loss between the free space and the fiber was significantly large. Therefore, most of the light was not delivered by the fiber. Because of the multi-path interferometric configuration constructed with bulk optics, the proposed system is more suitable for bulk optic amplifiers, which can generate ultra-high energy pulses. In this case, the thermal issues should be considered and the optical components such as PBSs should be replaced with the high damage threshold and highly reflection coatings.

On the other hand, the proposed optical fiber based DPA module is suitable for the amplification by YDFAs. Compared to a bulk type of DPA module based on the multi-path interferometer, it has a relatively simple optical configuration and avoids

the coupling loss because of splicing of all fiber components, advantageous for miniaturization. In this investigation, the proposed optical fiber based DPA module divides the pulses spatially, amplifies each pulse, and then combines them again. For combining the divided pulses, the LOCSET control method was also used and the PID control was performed. Then, the Allan deviation value was calculated as 1.09×10^{-3} (1 s.) to evaluate the stability.

We expect the proposed DPA systems can be used for ultra-high energy pulses and they are commercially available for science and industrial fields.

key words: femtosecond pulse laser, coherent pulse combining, divided pulse amplification, temporal-divided pulse amplification, spatial-divided pulse amplification, multi-path interferometric configuration, compact DPA module, Yb doped fiber, fiber based DPA module

제1장 서론

제1절 연구 배경

1960년대 루비 레이저가 최초로 개발된 이후, CO₂, He-Ne, Nd:YAG 등 다양한 매질에서 발전이 가능한 레이저들이 꾸준히 개발되었으며, 이와 더불어 레이저의 출력을 높이려는 연구가 계속 진행되어 왔다. 한편, 레이저의 개발을 통해 레이저의 응용 분야는 지속적으로 확대되어 왔으며, 최근 들어 레이저는 산업용으로 발전하면서 가공 분야에서 널리 활용되고 있다. 레이저 가공은 비접촉 방식의 가공으로 친환경적이고, 높은 정밀도와 빠른 가공속도 등 여러 장점을 지니기 때문에, 현재 반도체, 자동차 및 디스플레이 등의 광범위한 산업 분야에서 부품을 미세 가공하는 필수적인 기술로서 다양하게 활용되고 있고, 응용 범위 또한 급속히 증가하고 있다. 특히, 펄스 레이저 (pulse laser)의 등장으로 레이저는 정밀 미세 가공 분야에 널리 적용되었으며, 주로 나노초 (nanosecond) 펄스 레이저나 피코초 (picosecond) 펄스 레이저가 활용되고 있다. 그러나 이와 같이 비교적 넓은 펄스 폭을 가지는 레이저 가공은 가공된 면에서 열적 현상에 의한 재료의 변질, 미세 크랙 등의 문제가 발생하고 있다. 이를 개선하기 위해 기존의 펄스 레이저보다 정밀하고 미세한 가공이 가능한 펨토초 펄스 레이저 (femtosecond pulse laser)의 필요성이 대두되었으며 [1], 이를 활용한 레이저 미세 가공 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 나노초 및 피코초 펄스 레이저 가공의 경우에는 가공 형상 주위에 넓은 열영향부와 열 손상 및 미세 크랙이 발생하여 정밀도가 상대적으로 낮으며, 이로 인해 레이저 정밀 미세 가공이 어렵다 [2]. 하지만 펨토초 펄스 레이저 가공은 열확산 길이가 나노초 및 피코초 펄스 레이저 가공에 비해서 매우 짧기 때문에, 플라즈마 (plasma)나 유동장의 형성 이전에 어블레이션 (ablation)이 일어나고, 이를 통해 재료의 열적 손상이나 구조 변화를 억제시킴으로써 정밀 미세 가공이 가능한 장점을 가진다.

펨토초 펄스 레이저는 1980년 초반에 100 fs 미만의 펨토초 색소 레이저로 처음 개발되었으나 [3], 일정 주기마다 색소를 교체해야 하는 문제와 출력의 불안정성으로 인해 1980년대 중반부터 다이오드가 펌핑된 Nd:YAG, Nd:YLF 등의 고체레이저와 티타늄 사파이어 (Ti:sapphire)를 이용한 고체 레이저가 개발되었다 [4]. 티타늄 사파이어 기반의 펨토초 레이저는 광학적 Kerr 효과를 이용한 자기 모드 잠금 (self

mode-locking) 방법을 이용해 간단한 공진기 구성으로 안정적이고 효과적인 펄스 생성이 가능하다. 그러나 초기의 티타늄 사파이어 레이저는 비교적 큰 광학 부품으로 구성되었기 때문에, 환경에 민감하고 출력이 100 mW 정도로 낮아 산업에 적용하기에 용이하지 않았으나, 이후 처프 펄스 증폭 (chirped pulse amplification, CPA) 방법을 통해 TW 급의 고출력 펄스 레이저가 개발되어 레이저 가공에 적용되기 시작하였다 [5]. 펄스 레이저는 짧은 펄스 폭으로 인해 빠른 시간 동안 일어나는 현상 등을 연구할 수 있으며, 작은 에너지로 큰 침투 출력을 낼 수 있기 때문에 정밀 미세 가공용 레이저로 적합하다. 최근에는 기존의 부피가 큰 광결정 펄스 레이저에 비해 소형화 및 외부 환경에 강점이 있는 희토류 원소가 도핑 된 광섬유 [6]를 이득 매질로 사용하는 광섬유 기반 펄스 레이저에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.

일반적으로 펄스 레이저를 정밀 가공 분야에 응용하기 위해서는 펄스 당 높은 에너지를 필요로 하기 때문에 고출력 레이저의 필요성이 대두된다. 펄스 레이저를 고출력 레이저로 활용하기 위해서 광 증폭 방법을 사용하며, 대표적으로 1985 년도에 제안된 고출력을 얻는 증폭 방법인 처프 펄스 증폭 방법이 사용된다 [7]. 그림 1.1과 같이 처프 펄스 증폭 방법은 피코초나 펄스 폭을 갖는 레이저에서 출력을 높이기 위해 고안된 기술로 고출력 레이저 분야에서 널리 이용되는 기술이다. 처프 펄스 증폭 방법은 매우 짧은 펄스의 레이저광을 회절격자 (diffraction grating)를 사용하여 펄스 폭을 확장함으로써 매질이 손상되는 것을 방지하고, 광손상 없이 증폭 매질을 통과시켜 이득 매질에서 에너지를 얻은 후, 다시 회절격자로 모아서 펄스 폭을 압축함으로써 광출력을 극대화하는 방법이다. 이러한 방법으로 극초단 레이저 펄스의 에너지를 안정적으로 증가시켜 침투 출력을 획기적으로 증가시킴으로써 고출력의 펄스 레이저 발전이 가능해진다.

처프 펄스 증폭 기술의 등장으로 고출력 레이저 개발에 소요되는 시간, 공간, 비용 문제 등을 한 번에 해결함으로써, 극초단 고출력 레이저 개발에 처프 펄스 증폭 기술이 표준으로 자리 잡게 되었다. 처프 펄스 증폭 기술은 레이저 출력을 비약적으로 증가시켰으며, 고출력 레이저를 소형으로 제작함에 따라 대학 실험실 수준에서 극초단 고출력 레이저를 쉽게 활용할 수 있게 되었고, 산업과 의학 분야 등 다양한 분야에서 활용할 수 있게 되었다. 이 공로로 인해 프랑스 에콜폴리테크니크의 제라르 무루 (Gérard Mourou) 교수와 캐나다 워털루대학의 도나 스트릭랜드 (Donna Strickland) 교수가 2018년 노벨물리학상을 수상하게 되었다. 그러나 단일 펄스의 처프 펄스 증폭 방법을 사용했을 때, 높은 펄스 에너지로 인해 증폭 매질의 열적 손상 (damage

threshold) 가능성이 존재하고, 반사 거울, 렌즈와 같은 광학 부품 (optical component) 들이 손상되는 문제가 발생할 수 있으며, 라만 산란 (Raman scattering)과 브릴루앙 산란 (Brillouin scattering) 등의 매질에서 생기는 비선형 효과 (nonlinear effect)로 인해 증폭 효율이 감소하는 문제점이 발생한다 [8]. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 광 결합 (beam combining, BC) 방법이 제안되었고, 광 결합 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [9].

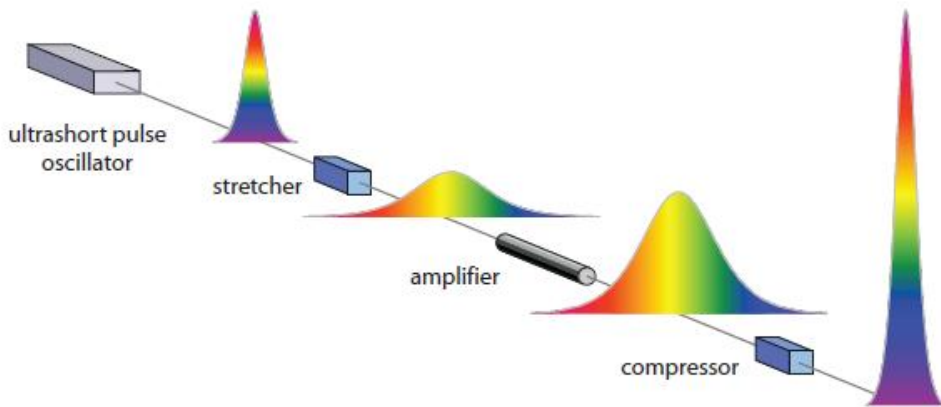


그림 1.1 처프 펄스 증폭 (CPA) 원리

제2절 연구 현황

고출력 펄스 레이저의 효과적인 광 증폭을 위한 광 결합은 결합 원리에 따라 다음과 같이 파장 광 결합 (wavelength beam combining, WBC) 방법, 비가간섭 광 결합 (incoherent beam combining, IBC) 방법, 가간섭 광 결합 (coherent beam combining, CBC) 방법으로 나눌 수 있다.

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

가간섭 광 결합 방법은 다른 두 방법과는 달리 광경로의 동일함 및 상대적인 위상 제어의 조건이 필요하므로, 이를 위한 위상 제어 방법이 필수적이며 펄스 레이저의 광 결합에 있어 적합한 방법이다. 가간섭 광 결합의 위상 제어 방법은 다양한 원리로 구현되며, 다음과 같이 대표적인 2개의 기술이 현재 널리 활용되고 있다.

- 헤테로다인 위상 잠금 방법
- LOCSET 방법

1. 광 결합

광 결합 방법은 그림 1.2와 같이 파장 광 결합 방법, 비가간섭 광 결합 방법, 가간섭 광 결합 방법으로 나눌 수 있다. 파장 광 결합 방법은 분산 광학 부품을 이용해 근거리 및 원거리에서 서로 다른 파장의 광을 결합하는 방법으로, 이색 거울 (dichroic mirror), 프리즘 (prism), 회절격자 (diffraction grating) 등을 사용하여 그림 1.2 (a)와 같이 구성된다. 파장 광 결합 방법은 가간섭 결합이 필요하지 않으므로 위상을 맞춰줄 필요성이 없기 때문에, 간단한 구성이 가능하고 서로 다른 파장을 통해 광세기 (intensity)를 증가시킬 수 있지만 [10], 원리적으로 서로 다른 파장의 광들을 결합하기 때문에 광 품질 (beam quality)이 저하되는 결과가 발생하므로 펄스 결합에는 적합하지 않다 [11-12].

그림 1.2 (b)의 비가간섭 광 결합 방법은 같은 파장 광들을 결합시키지만, 결합하는

광들의 위상 조건을 고려하지 않기 때문에, 간섭계 구성을 통해 광경로를 조절해야 할 필요가 없다. 그러나 파장 광 결합 방법과 마찬가지로 위상을 고려하지 않기 때문에 광세기는 결합하는 광의 수만큼 증가하지만, 광 품질의 저하가 발생하므로 이 역시 펄스 레이저의 광 결합에 한계를 가지는 단점이 있다 [13].

그림 1.2 (c)는 가간섭 광 결합 방법으로 결합하는 광들이 위상, 편광 및 광경로 등이 동일해야 하는 조건이 필요하기 때문에, 위상 제어 방법이 필수적이며 구성이 다소 복잡해지는 단점이 있지만 [14-15], 각 광의 위상과 편광을 고려함으로써 높은 출력의 광을 얻을 수 있고 고품질의 광을 획득할 수 있기 때문에 레이저의 펄스 결합에 유리하다. 이러한 가간섭 펄스 결합 연구는 그동안 다양한 방법으로 연구가 진행되었으며, 최근에 그림 1.3과 같이 시간 영역 및 공간 영역에서 분할된 펄스를 각각 증폭한 이후에 가간섭 펄스 결합을 통해 고출력 펄스 레이저를 생성한 연구가 보고되었다 [16]. 그림 1.3의 전체 구성은 시간 분할 영역, 공간 분할 및 증폭 영역, 분할된 펄스를 결합할 수 있는 결합 영역, 분할된 펄스들의 가간섭 결합을 위한 제어 영역으로 나누어진다. 시간 분할 영역에서는 두 세트의 마이켈슨 간섭계를 통해 반파장 위상 지연판 (half wave plate, HWP)과 1/4파장 위상 지연판 (quarter wave plate, QWP)으로 4개의 시간 지연된 펄스들이 생성되고, 각각의 펄스들은 6 ns의 시간 간격을 가지게 된다. 분할된 4개의 펄스들은 공간 분할 영역에서 마하젠더 간섭계를 통해 2채널로 분할되며, 4개씩 분할된 펄스가 2개의 광 증폭기를 통과한다. 증폭된 펄스들은 결합 영역에서 하나의 펄스로 결합되고 안정적인 가간섭 펄스 결합을 위해 위상 제어 방법이 사용된다. 그림 1.3의 가간섭 펄스 결합 방법의 구성은 레이저의 가간섭 펄스 결합 방법에 있어 효율적이며, 고출력 레이저 펄스를 생성하는데 있어 효과적인 방법이지만, 전체시스템 구성이 다소 복잡하고 크기가 매우 크다는 단점을 가진다. 시간 영역에서 6 ns의 지연된 펄스를 생성하려면, 각각의 마이켈슨 간섭계 길이는 1.8 m와 0.9 m의 크기로 커진다. 또한, 결합 영역의 모듈도 마찬가지로 분할 영역의 모듈과 같은 크기의 간섭계가 구성되어야 하므로, 전체 시스템 구성이 커지기 때문에 산업계에 적용하기 힘든 문제가 발생한다.

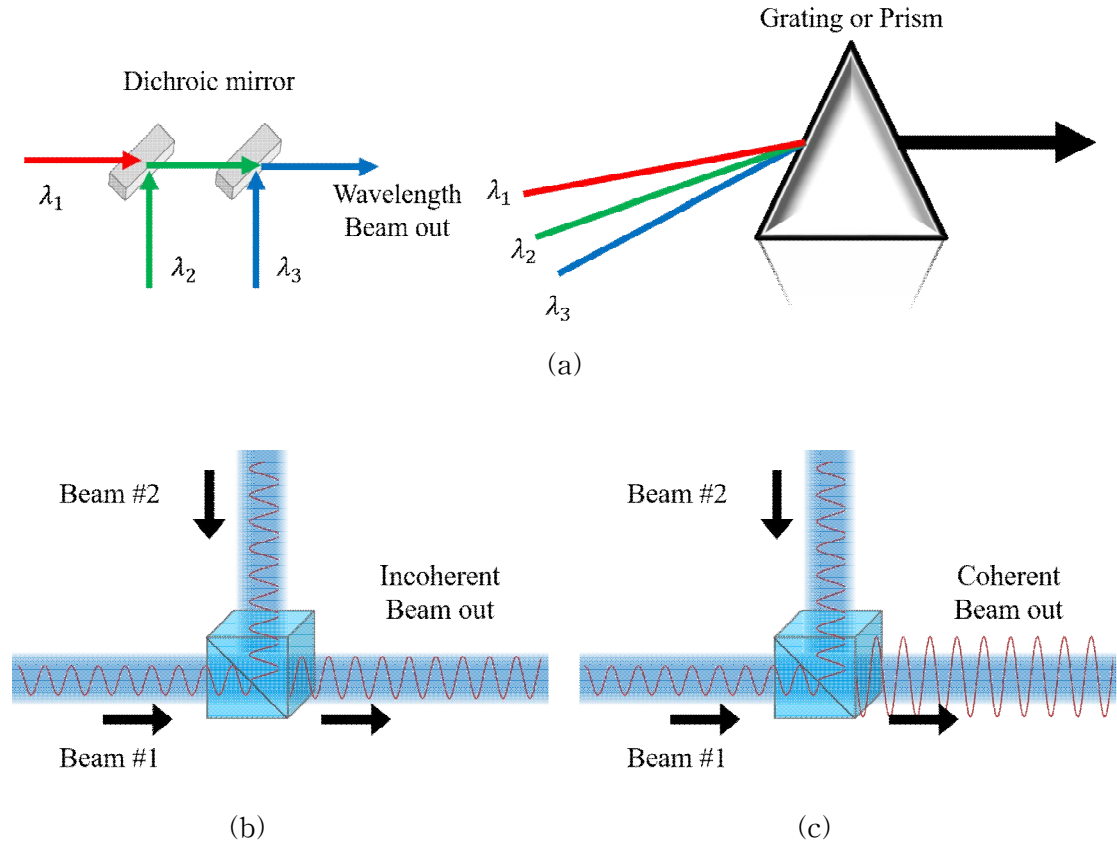


그림 1.2 고효율 레이저를 구성하기 위한 광 결합 방법
 (a) 파장 광 결합, (b) 비가간섭 광 결합, (c) 가간섭 광 결합

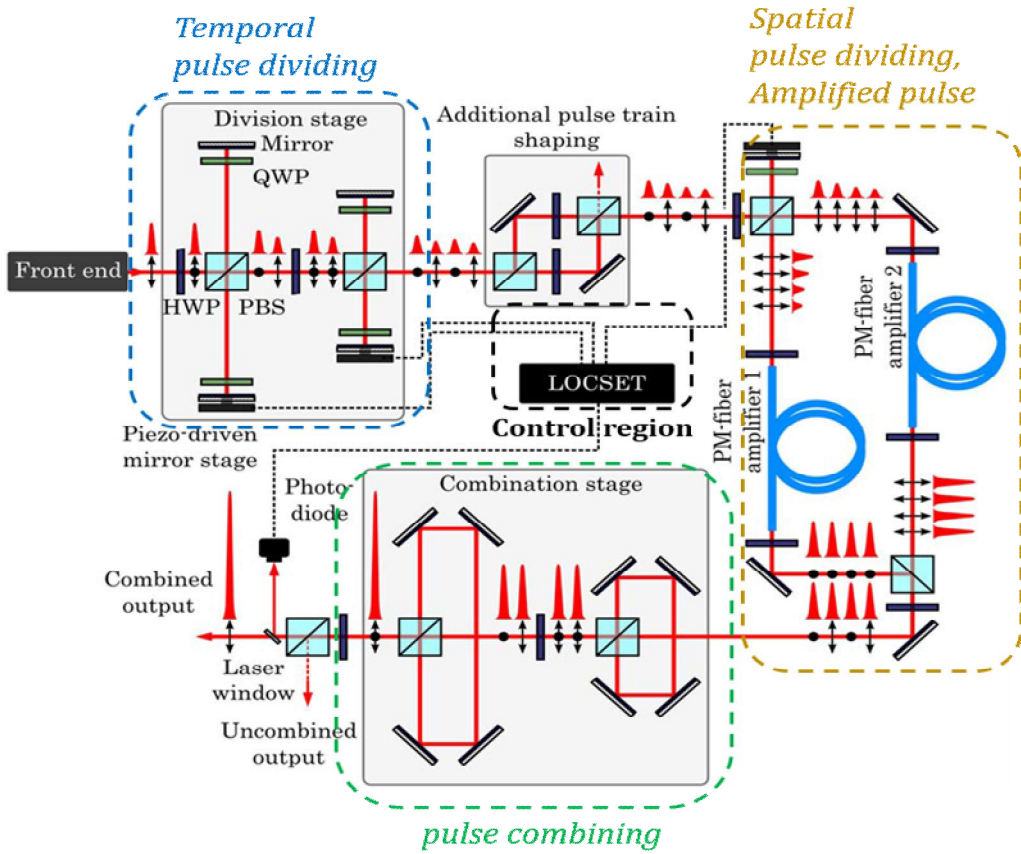


그림 1.3 펄스 레이저의 시간-공간 영역의 가간섭 펄스 결합에 대한 선행 연구 [16]

2. 위상 제어 방법

위상 제어 방법 중 하나인 헤테로다인 위상 잠금 (heterodyne phase locking) 방법은 단일 레이저에서 나오는 광을 원하는 주파수 차이를 가지도록 두 개의 광 신호로 만들어, 하나의 광 신호는 음향 광학 변조기 (acousto-optic modulator, AOM)를 통해 광주파수를 천이시키고, 이를 다른 광 신호와 결합하여 맥놀이 (beating) 신호의 위상을 잠금 하는 방법을 이용한다. 그러나 헤테로다인 위상 잠금 방법은 채널 수가 증가함에 따라 그에 상응하는 음향 광학 변조기가 필요하고, 광 배열마다 광 검출기가 필요하기 때문에 시스템 구성이 커지게 되므로 다채널로 구성하기 힘든 단점이 있다 [17].

한편, 가간섭 펄스 결합을 위한 위상 제어 방법 중 또 다른 위상 제어 방법인 LOCSET (locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging) 안정화 방법 [18]은 변조 (modulation) 및 복조 (demodulation) 기법을 통해 위상 잠금을 수행하며, 이를 통해 펄스들의 광 결합 시 펄스들의 상대적인 위상차를 제어 신호로 이용하여 위상을 제어하는 방법이다. LOCSET 방법은 변조 신호의 주파수에 따라 간섭계를 통해 획득되는 간섭 신호들을 하나의 광 검출기로 획득하여 전자적으로 각각의 위상을 제어 할 수 있기 때문에, 헤테로다인 위상 잠금보다 시스템 구성이 소형화가 가능하다는 장점이 있다.

제3절 연구목표 및 내용

본 논문에서는 산업계에서 요구하는 고출력 펄스 레이저의 개발을 위한 효과적인 가간섭 광 결합 방법에 대한 연구를 진행하고, 분할 펄스 증폭 (divided pulse amplification, DPA) 방법을 통해 높은 결합 효율의 가간섭 펄스 결합 모듈을 개발하는 것을 목표로 한다. 기존의 다양한 구성을 가지는 DPA 모듈은 펄스 레이저의 가간섭 펄스 결합을 위해서 분할 영역의 모듈과 경로가 같은 결합 영역의 모듈이 필요하기 때문에, 시스템이 커지는 단점을 지니고 있으므로 실험실 단계에서 사용할 수 있는 기술이지만 상용화에는 한계를 가진다. 그래서 본 연구에서는 다중 경로 간섭계 기반의 시간-공간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방식을 도입함으로써, 펄스의 분할, 증폭, 결합을 실험적으로 검증하고, 소형화 및 상용화가 가능한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 구현한다. 이를 위해, 펄스 레이저의 펄스 분할 및 결합 모듈의 설계를 진행하고, 제작하여 실험적 검증을 수행한다. 또한, 펄스가 시간-공간 영역의 분할 모듈에서 분할되고, LOCSET 안정화 방법을 통해 가간섭 결합함을 검증하여 펄스 분할 및 결합 모듈의 성능 평가를 진행한다. 또한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 펄스 결합 효율과 출력을 개선하기 위해, 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 시스템을 개발하고 이를 실험적으로 검증한다. 본 연구의 목표 달성을 위한 세부 연구내용은 다음과 같다.

- 펄스 레이저의 시간 영역에서 펄스 분할 및 공간 영역에서 펄스 분할
- 상용화를 위한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈 설계 및 제작
- 가간섭 펄스 결합을 위한 LOCSET 안정화 방법
- 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 가간섭 펄스 결합 및 성능 평가
- 광섬유 기반 모듈의 가간섭 펄스 결합 제어 및 결과

본 논문은 제2장에서 분할 펄스 증폭 방법을 제안한 이유와 기본 원리를 설명하고, 기존의 분할 펄스 증폭 모듈이 가지는 한계를 극복하기 위한 방법으로 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 제안한다. 또한, 레이저 펄스의 가간섭 결합 조건과 이를 위한 LOCSET 시스템을 설명한다. 제3장에서는 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 실험 결과를 분석하고, 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈이 가지는 한계점을 극복하기 위한 방법으로 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈을 제안하고, 실험 결과를 분석한다. 제4장은 고찰 및 논의로 구성되며, 제5장은 결론으로 구성된다.

제2장 분할 펄스 증폭 기술을 이용한 가간섭 펄스 결합 모듈

제1절 고출력 레이저를 위한 펄스 증폭

1. 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리

분할 펄스 증폭 (divided pulse amplification, DPA) [19] 방법은 2007년에 처음으로 제안되었고, 고출력 레이저 시스템에서 널리 응용되고 있다. 펄스의 증폭을 위해서 분할 펄스 증폭 시스템은 단일 CPA 시스템보다 비교적 효율적이며, 펄스를 나누기 때문에 증폭 매질 및 광학 부품의 손상을 줄일 수 있고, 광학적 비선형 효과를 피하거나 줄일 수 있다는 장점을 가지며, 우수한 광 품질과 효율성으로 높은 침투 출력을 생성할 수 있다. 분할 펄스 증폭 방법은 높은 침투 출력을 생성하는 새로운 방법이며 하나의 단일 증폭기만 사용하는 것이 아니라, 여러 개의 증폭기를 사용하여 증폭을 한 후, 출력을 결합하는 방법이다.

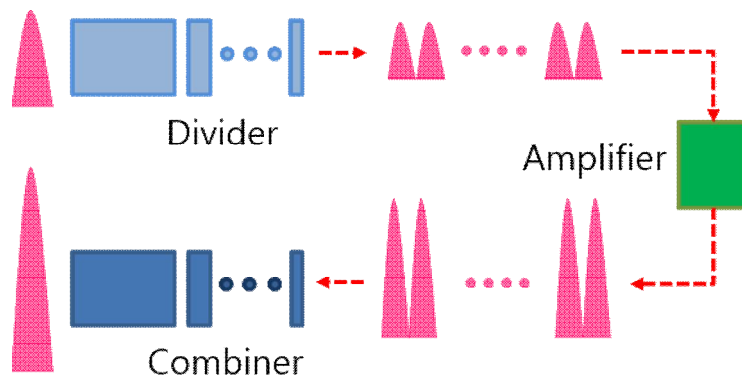


그림 2.1 분할 펄스 증폭의 개념

분할 펄스 증폭 방법은 그림 2.1과 같이 크게 세 부분으로 분할기 (divider), 증폭기 (amplifying medium), 결합기 (combiner)로 구성될 수 있다. 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리는 펄스를 증폭 전에 여러 개의 펄스로 나누고 증폭 후에 하나의 펄스로 결합하는 원리로 가간섭 광 결합 (coherent beam combining)을 기본으로 구현된다. 출력

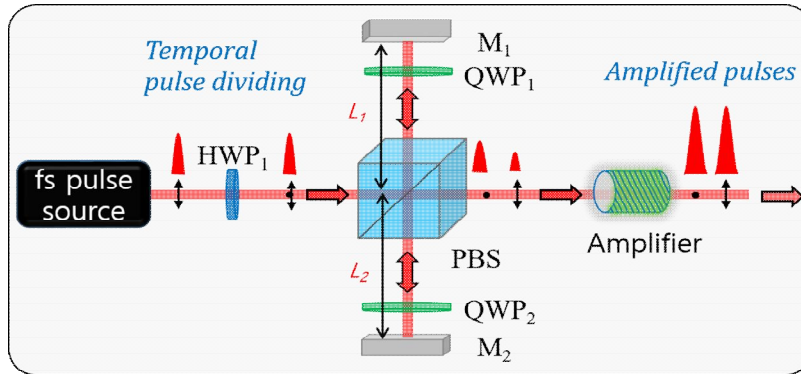
이 낮은 펄스가 분할기에 입사하여 각각의 채널 (시간 영역 또는 공간 영역)에서 분할되고, 분할된 펄스들이 각각의 증폭기를 통해 증폭된 후, 하나의 펄스로 결합되어 높은 출력을 가지는 펄스를 생성한다. 분할 펄스 증폭 방법은 시간 영역의 분할 펄스 증폭 방법과 공간 영역의 분할 펄스 증폭 방법으로 나눌 수 있다.

1-1. 시간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리

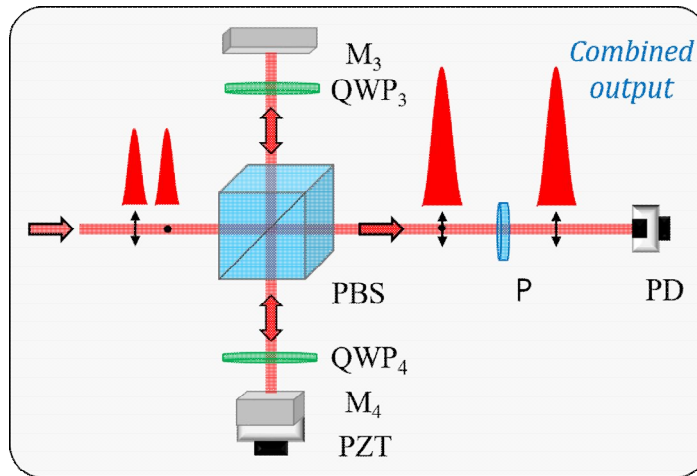
펄스의 첨두 출력을 향상시키는 시간 영역의 분할 펄스 증폭 (temporal-divided pulse amplification, T-DPA) 방법은 단일 증폭기로 여러 개의 펄스를 증폭시키는 방법이다. 또한, 분할된 펄스들이 단일 증폭기를 통해 증폭되기 때문에 공간 영역의 분할 펄스 증폭과 비교하면 모듈의 크기를 줄일 수 있고, 시간차로 펄스를 분할할 수 있기 때문에 증폭 매질의 효율을 극대화할 수 있는 장점이 있다 [16, 20-21]. 시간 영역의 분할 펄스 증폭 방법의 기본 구성은 그림 2.2와 같이 마이켈슨 간섭계 기반으로 구성된 것을 생각할 수 있다. 그림 2.2 (a)는 시간 영역에서 펄스를 분할하기 위한 기본 구성을 나타내며, 입력 펄스는 45° 회전된 반파장 위상 지연판 (half wave plate, HWP)을 통과하면서 선형 편광 상태를 가지고, p-편광 상태의 펄스는 편광 광분할기 (polarizing beam splitter, PBS)를 투과하며, s-편광 상태의 펄스는 편광 광분할기에서 반사하게 된다. s-편광 펄스는 편광 광분할기에서 반사한 후, 마이켈슨 간섭계의 거울 (M₁)에서 반사되어 45° 회전된 1/4파장 위상 지연판 (quarter wave plate, QWP)을 두 번 통과하기 때문에 편광상태가 p-편광으로 바뀌게 된다. p-편광으로 바뀐 펄스는 다시 편광 광분할기를 투과하게 되고 거울 (M₂)에서 반사하며, 같은 원리에 의해 1/4파장 위상 지연판을 두 번 통과하므로 p-편광은 s-편광으로 바뀌게 된다. 결국, 편광 광분할기를 먼저 투과한 p-편광과 반사를 겪고 난 후의 s-편광은 시간 지연을 가지게 되며, 시간 영역에서 분할된 펄스들 사이의 시간 지연 (t)은 다음과 같이 식 (1)처럼 표현할 수 있다.

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

여기서 L₁과 L₂는 그림 2.2 (a)의 편광 광분할기를 기준으로 거울들 (M₁, M₂)사이의 거리이며, c₀는 진공 중에서 빛의 속도이다.



(a)



(b)

그림 2.2 (a) T-DPA의 기본 구성도, (b) T-DPA에서 분할 된 증폭 펄스 결합의 구성도 (femtosecond pulse laser, HWP: half-wave plate, QWP: quarter-wave plate, PBS: polarizing beam splitter, M: mirror, amplifier, P: polarizer, PD: photodetector)

그림 2.2 (a)에서 시간 지연된 펄스들은 광 증폭기를 통해 증폭된 이후, 그림 2.2 (b)의 결합 영역에서 시간 지연을 보상하기 위해 L_1 , L_2 의 거리와 같은 마이켈슨 간섭계가 구성되며, 이후 펄스들은 증폭된 하나의 펄스로 결합된다. 펄스들이 가간섭 결합하기 위해서는 미세한 광경로 조정이 필요하기 때문에 압전 구동기 (piezoelectric transducer, PZT)에 부착된 거울 (M_4)을 통해 광경로를 조정하며, 이를 통해 가간섭

결합이 가능해진다. 그러나 그림 2.2와 같이 시간 영역에서 분할 펄스 증폭 방법을 구현하면, L_1 과 L_2 의 거리에 의해 시간 지연이 결정되므로 분할된 펄스를 결합하기 위해 L_1 과 L_2 의 거리만큼 같은 형태의 간섭계가 구성되어야 하며, 간섭계의 크기는 커질 수밖에 없는 문제가 발생한다.

1-2 공간 영역에서의 분할 펄스 증폭 방법의 기본 원리

공간 영역에서 분할 펄스 증폭 방법 (spatial-divided pulse amplification, S-DPA)은 일반적으로 알려진 분할 펄스 증폭 방법이며, 광을 공간적으로 N개의 광으로 분할하고, 공간적으로 분리된 N개의 증폭기를 통해 증폭시킨 후, 결합 영역을 통해 하나의 펄스로 결합하여 고출력 펄스를 생성시키는 방법이다.

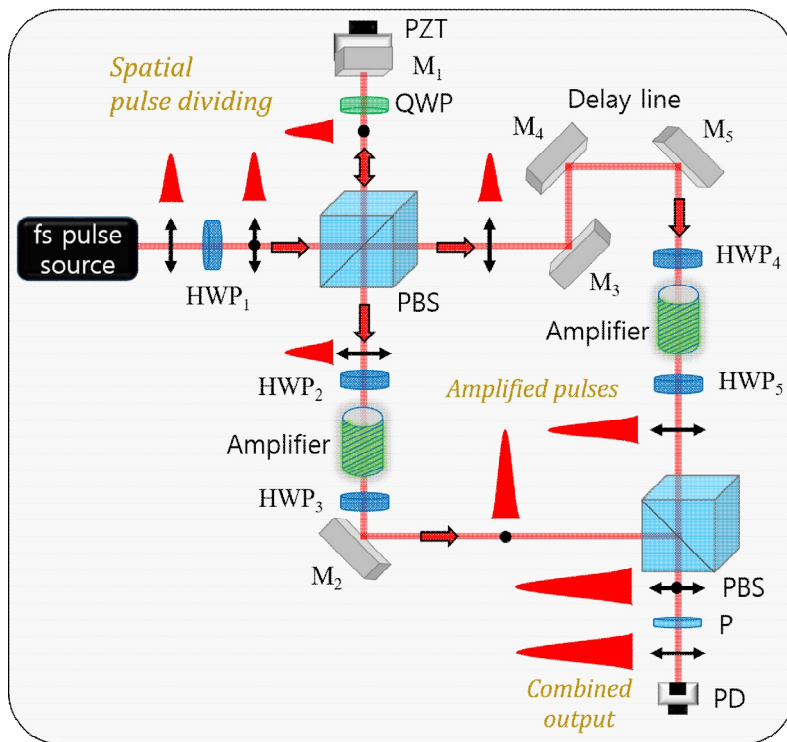


그림 2.3 S-DPA의 기본 구성도 (femtosecond pulse laser, HWP: half wave plate, QWP: quarter wave plate, PBS: polarizing beam splitter, PZT: piezoelectric transducer, M: mirror, amplifier, P: polarizer, PD: photodetector)

공간 영역의 분할 펄스 증폭 방법의 기본 구성은 그림 2.3과 같이 마하젠더 간섭계 (Mach-Zehnder interferometer) 기반의 분할 펄스 증폭 방법으로 생각할 수 있다 [22]. 입력 펄스는 45° 회전된 반파장 위상 지연판을 지나 p-편광 상태의 펄스는 투과하게 되고, s-편광 상태의 펄스는 반사하게 된다. s-편광 펄스는 압전 구동기에 부착된 거울 (M_1)에서 반사하고 45° 회전된 1/4파장 위상 지연판을 두 번 통과하기 때문에 s-편광 펄스는 p-편광 펄스로 바뀌어 편광 광분할기를 투과하게 된다. 투과한 펄스들은 각각 반파장 위상 지연판, 증폭기, 시간 지연기 (delay line)를 통과한 이후, 펄스들은 증폭을 하게 되고, 편광 광분할기를 통해 결합하게 된다. 공간적으로 나누어진 펄스들이 가간섭 펄스 결합하기 위해서는 두 펄스들 간의 광경로 (optical path length, OPL)를 맞춰주어야 하며, 동일한 광경로를 위해 시간 지연기의 구성이 필요하고, 미세하게 경로를 조정해야 하므로 압전 구동기를 이용해 광경로를 조정한다.

제2절 레이저 펄스의 분할 및 결합 구성

1. 다중 경로 간섭계 기반의 펄스 분할 및 결합

그림 2.4는 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 구성을 나타내며, 소형 DPA 모듈은 광원으로 분산에 의해 펄스 폭이 비교적 넓어진 펄스 레이저를 이용하고, 반파장 위상 지연판, 1/4파장 위상 지연판, 편광 광분할기, 거울, 압전 구동기 등의 광학 부품들을 사용하여 구성된다. 광원에서 발진된 레이저 펄스는 45° 회전된 반파장 위상 지연판 (HWP_1)을 지나 편광 광분할기 (PBS_1)의 상단 부분으로 들어가게 되고 p-편광 상태의 펄스는 그대로 투과하게 된다. 편광 광분할기 (PBS_1)에서 반사한 s-편광 상태의 펄스는 거울 (M_1)에서 반사하고 45° 회전된 1/4파장 위상 지연판 (QWP_1)을 두 번 통과하여, 편광이 p-편광 상태로 바뀌게 된다. 이후 p-편광 상태의 펄스가 편광 광분할기 (PBS_1)를 투과하고 거울 (M_2)에서 반사한 후, 다시 편광 광분할기 (PBS_1)을 투과하여 거울 (M_2)에 다시 입사한다. 이때 거울 (M_2)에서 반사된 펄스의 편광 상태가 s-편광으로 바뀌게 되기 때문에, 편광 광분할기 (PBS_1)에서 반사하여 거울 (M_3)로 향한다. 그러면 이전과 같은 원리에 의해 거울 (M_3)에서 반사된 s-편광 펄스는 p-편광 펄스로 바뀌게 되고 거울 (M_4)로 진행한다. 또한 거울 (M_4)에서 반사된 p-편광 펄스는 다시 s-편광 펄스로 바뀌어 거울 (M_2)로 진행하고, 최종적으로 편광 광분할기 (PBS_1)에서 반사하여 처음에 편광 광분할기 (PBS_1)를 투과했던 p-편광 펄스보다 광경로차에 해당하는 시간 지연을 가지게 된다. 본 논문에서 제안하는 시간 영역의 DPA 모듈은 다중 경로 간섭계를 이용하기 때문에 광학구성의 크기에 비해 매우 긴 광경로차를 이용한 시간 지연이 가능해지고, 거울 (M_1, M_2, M_3, M_4)들의 거리를 조절하게 되면 좁은 공간에서 시간 지연된 두 펄스의 시간 지연을 더욱 넓힐 수 있다. 이후 시간 지연을 갖는 두 개의 펄스들은 반파장 위상 지연판 (HWP_2)을 통해 편광 광분할기 (PBS_2)를 지나게 되면, 각각 공간적으로 두 개의 펄스들로 분할이 가능하며, 분할된 펄스들은 각각 그림 2.5와 같은 광섬유 기반의 광 증폭기 (optical fiber amplifier)로 입사하게 된다. 광 증폭기에 입사한 펄스들은 광 증폭기를 통해 증폭되고, 증폭된 펄스들은 다시 모듈로 입사하여 그림 2.4와 같이 펄스들의 분할 경로와 반대로 진행한다. 이때, 증폭된 펄스들은 편광 광분할기 (PBS_2)의 하단 부분으로 들어가서 펄스가 분할될 때와 공간적으로 분리된다. 증폭된 펄스들은 각각 p-편광 상태의 펄스를 가지고 있기 때문에, 한쪽의 펄스들은 거울 (M_6)을 반사한 후 편광 광분할기 (PBS_2)를 투과하고, 다른 한쪽

의 펄스들은 편광 광분할기 (PBS_2)를 투과하여 거울 (M_7)에서 반사하며, 45° 회전된 $1/4$ 파장 위상 지연판 (QWP_4)을 두 번 통과하기 때문에 s-편광 상태로 바뀌어 편광 광분할기 (PBS_2)에서 반사한다. 거울 (M_6)와 편광 광분할기 (PBS_2)의 거리가 거울 (M_5)에서 편광 광분할기 (PBS_2)의 거리에 2배일 때, 편광 광분할기 (PBS_2)를 투과한 증폭된 펄스들과 반사한 증폭된 펄스는 공간적으로 결합한다. 이후, 결합한 두 개의 증폭된 펄스들은 45° 회전된 반파장 위상 지연판 (HWP_2)을 지나 s-편광 상태의 펄스와 p-편광 상태의 펄스로 나뉘지고, 시간 영역의 DPA 모듈에서 펄스 분할할 때와 서로 바뀐 경로를 겪으면서 하나의 증폭된 펄스로 결합한다. 이때, 펄스들의 결합을 위해 광경로를 조정할 수 있는 압전 구동기 (PZT_1, PZT_2)를 사용하였고, 외부 환경에 의해 변화하는 간섭 신호의 위상을 제어하기 위해 LOCSET 방법을 사용하게 되면 안정적인 가간섭 펄스 결합이 가능하다.

기존의 DPA 모듈 [16]은 분할 영역의 모듈과 경로가 같은 결합 영역의 모듈이 별도로 필요하기 때문에 시스템의 크기가 커지는 문제점을 가지고 있었지만, 본 논문에서는 기존의 연구에서 사용한 일반적인 간섭계와 달리 다중 경로 간섭계를 이용함으로써 좁은 공간을 활용해 펄스를 시간적으로 지연시킬 수 있으며, 펄스의 분할과 결합이 동일한 모듈에서 이루어지기 때문에 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

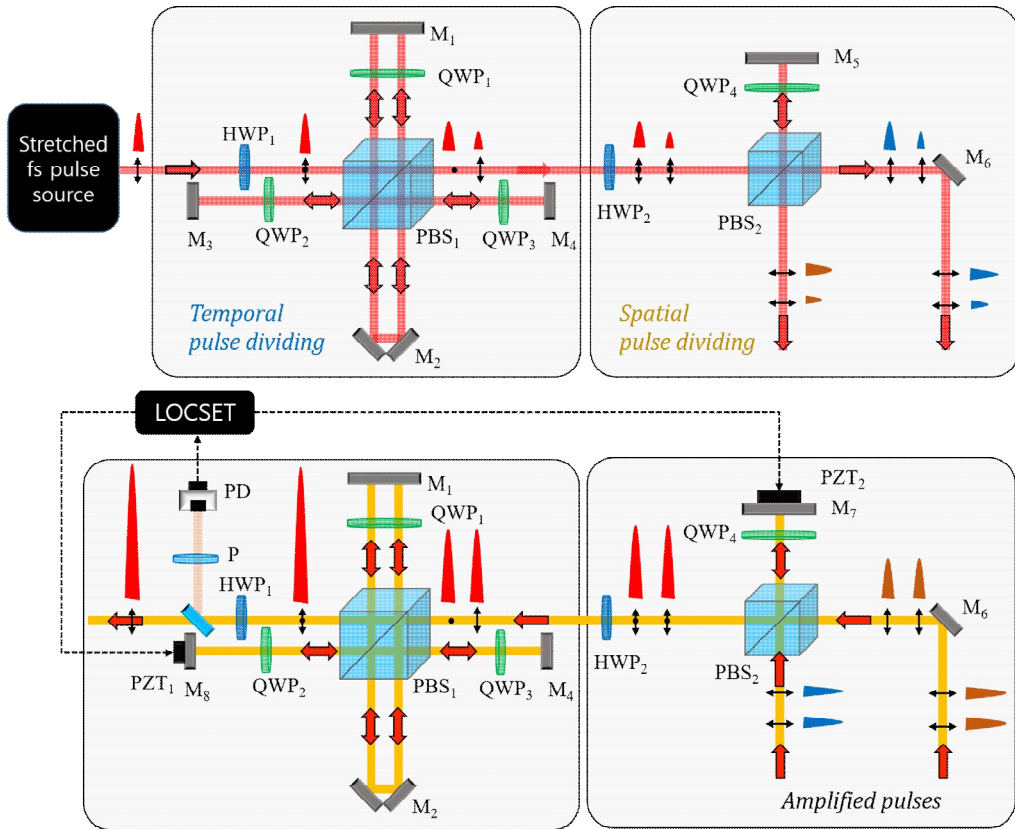


그림 2.4 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈 구성도
(femtosecond pulse laser, HWP: half wave plate, QWP: quarter wave plate, PBS: polarizing beam splitter, PZT: piezoelectric transducer, M: mirror, P: polarizer, PD: photodetector)

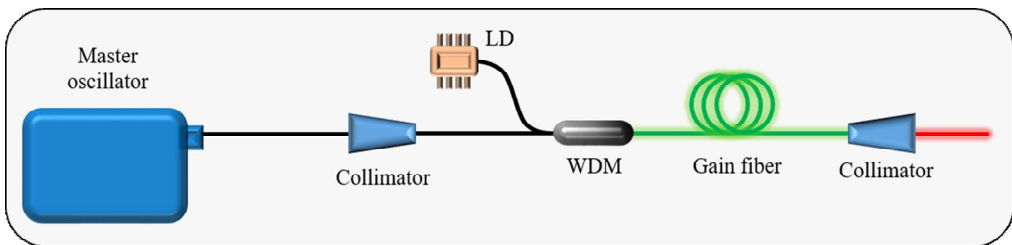


그림 2.5 광 증폭기 (Yb doped fiber amplifier)의 구성도
(LD: laser diode, WDM: wavelength division multiplex, gain fiber)

2. 광섬유 기반의 펄스 분할 및 결합

광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈은 앞서 설명한 그림 2.4와 같은 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에 비해 광학 부품을 많이 사용하지 않기 때문에 비교적 광학 구성이 간단하고, 희토류 원소가 도핑된 광섬유를 이득 매질로 사용하기 때문에 사용에 있어서 용이하며, 차지하는 부피, 안정화, 상용화 등에 있어 많은 장점을 가진다. 또한, 높은 펌프-신호 변환 효율 때문에 증폭 시스템을 통한 증폭 효율이 크다는 장점을 가진다.

그림 2.6은 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 구성을 나타낸다. 전체 시스템을 광섬유로 구성하고 펄스 분할/결합 모듈에 삽입되는 레이저 펄스를 광섬유 융착을 통해 손실을 최소화한다. 레이저에서 나온 펄스가 전 증폭기 (pre-amplifier)를 통해 증폭된 후, 편광 유지 광섬유 커플러 (polarizer maintaining fiber coupler)에 의해 공간적으로 분할된다. 이후 분할된 펄스들은 각각 광 파장 다중 분할기 (wavelength division multiplexer, WDM)를 지나게 되며, 레이저 다이오드로 펌핑된 희토류 원소가 도핑된 광섬유를 통해 각각 증폭된다. 증폭된 펄스들은 각각 광섬유 커플러 (fiber coupler, F.C)를 통해 출력되며, 0° 회전된 반파장 위상 지연판 (HWP_1)과 45° 회전된 반파장 위상 지연판 (HWP_2)을 두어 편광 상태를 맞춰주고, 압전 구동기 (PZT)를 사용해 광 경로차를 조정하면 펄스들이 결합한다. 이후, 외부 환경을 제어할 수 있는 방법으로 LOCSET 방법을 사용하면 안정적인 가간섭 펄스 결합이 가능하다.

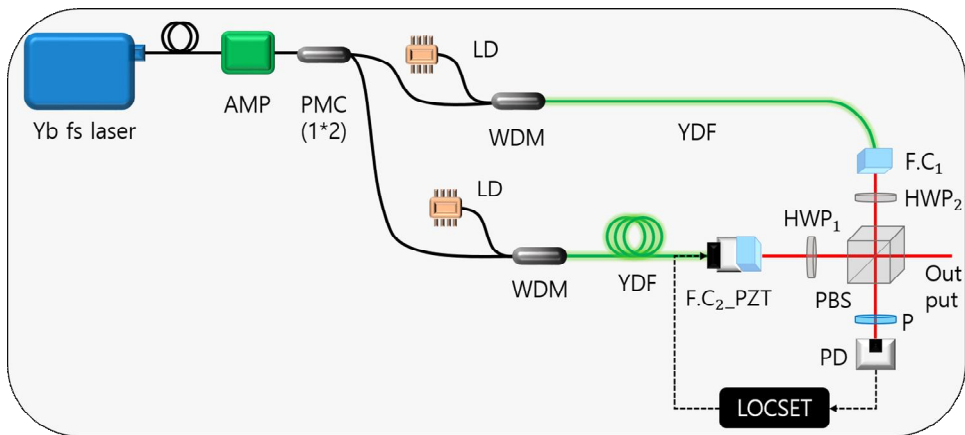


그림 2.6 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 구성도

3. 다중 경로 간섭계, 광섬유 기반의 펄스 분할 및 결합 비교

기존의 다양한 광학 구성을 가지는 DPA 모듈은 펄스들을 결합하기 위해서 분할 영역 모듈과 경로가 같은 결합 영역의 모듈이 필요하므로 시스템의 구성이 커질 수밖에 없는 문제가 발생한다. 하지만 그림 2.4와 같은 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈은 기존의 DPA 모듈에 비해 분할 영역의 모듈과 결합 영역의 모듈이 하나의 시스템으로 구성되기 때문에 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한, 펄스의 편광 상태에 따라 펄스를 시간 및 공간적으로 분할하고 각각을 증폭한 후 다시 결합하기 때문에 기존의 단일 처프 펄스 증폭이 가지고 있는 광학 부품의 열적 손상, 증폭 매질의 손상, 비선형 효과 등의 문제를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 하지만 광학 부품을 많이 사용하고, 구성이 다소 복잡하며 차지하고 있는 부피가 크기 때문에 정렬이 쉽지 않으며, 원하는 만큼의 시간 지연을 했을 경우 더 이상 모듈의 크기를 줄일 수 없는 한계를 가진다. 또한, 광 증폭기가 광섬유로 구성이 되어 있는 경우, 자유 공간 (free space)에서 광을 집속 시켰을 시, 광삽입 손실이 크게 발생하며 전체적으로 증폭 효율이 낮다는 문제가 발생한다.

그에 비해 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈은 구성이 비교적 간단하고, 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈이 가지는 부피의 문제점, 정렬의 문제점, 광삽입 손실의 문제점을 개선할 수 있는 장점이 있기 때문에 소형화 및 상용화에 유리하다. 또한 희토류 원소가 첨가된 광섬유는 좋은 빔 품질과 효율적인 열적 특성이 있기 때문에 열을 분산시킬 수 있는 장점이 있고, 빔 정렬에 구애를 받지 않는 특징을 가지기 때문에 정렬에 용이하며, 높은 출력 효율로 인해 고효율의 레이저 출력이 가능하다.

제3절 레이저의 펄스 결합 모듈 안정화

1. 레이저의 가간섭 펄스 결합 조건

가간섭 펄스 결합은 효율적인 동시에 안정성을 고려한 고출력 펄스 레이저 개발을 가능하게 한다. 그러나 가간섭 펄스 결합을 위해서는 결합되는 빔의 파면이 같아야 하며, 분할된 펄스 간의 상대적 위상차는 0이어야 한다. 이를 위해, 펄스의 분산과 비선형을 고려한 상대적인 위상 제어 및 편광 제어가 필요하며, 광경로가 동일해야 하는 조건이 필요하므로 이를 위한 위상 제어 방법이 필수적이다. 본 연구에서는 구성된 가간섭 펄스 모듈에서 가간섭 펄스 결합을 위한 위상 제어 방법으로 locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging (LOCSET) [23-24]을 사용하였다.

2. LOCSET 안정화 방법

LOCSET 방법은 RF의 변조 (modulation) 및 복조 (demodulation) 기법을 기반으로 펄스들 간의 간섭 신호를 이용하여 펄스들 간의 상대적인 위상차를 제어하는 방법이다. LOCSET 방법을 이용하면 가간섭 펄스 결합 모듈에서 최종적으로 위상의 제어를 통해 펄스들 간의 보강 간섭 상태를 안정적으로 유지할 수 있는 동시에 레이저 출력을 최대가 되도록 할 수 있는 장점이 있다. LOCSET 방법은 그림 2.7과 같이 미세하게 변조된 간섭 신호를 광 검출기 (photodetector, PD)로 획득한다. 이후, 전자회로에서는 변조 신호와 동일한 주파수를 갖는 기준 신호 (reference signal)의 sine과 cosine 신호를 이용하여 측정된 간섭 신호를 처리하며, 저역 통과 필터 (low pass filter)를 통해 획득한 두 개의 결과를 이용하여 진폭과 위상의 변화량을 추출한다. 이때, 획득되는 진폭의 변화량은 LOCSET 방법에서의 제어 신호로 사용될 수 있다. 그림 2.4의 압전 구동기에 변조 기법을 사용해 변조 주파수로 간섭계의 하나의 광경로를 변조한 후 광 검출기에서 획득되는 간섭 신호를 복조하면, 그림 2.8과 같은 제어 신호를 추출할 수 있다. 그리고 이를 통해 피드백 (Feedback) 제어로 펄스들의 위상 차이가 0이 되도록 고정시켜, 안정적으로 결합된 가간섭 펄스를 획득할 수 있다.

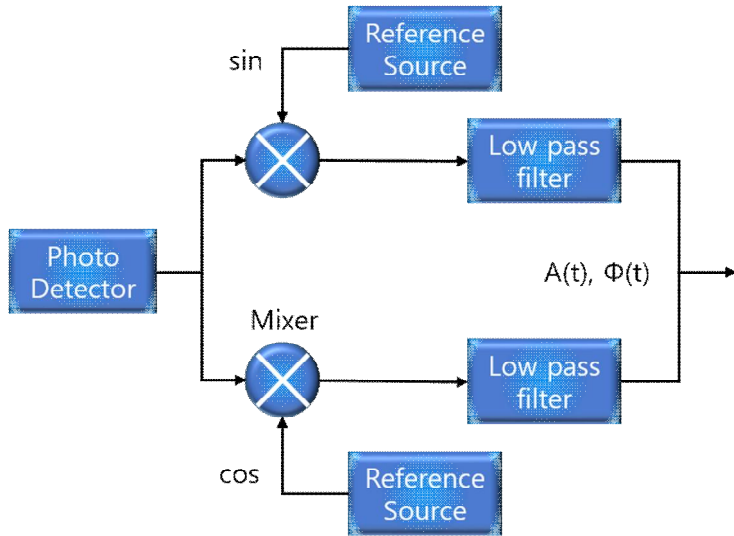


그림 2.7 LOCSET 방법의 구성도

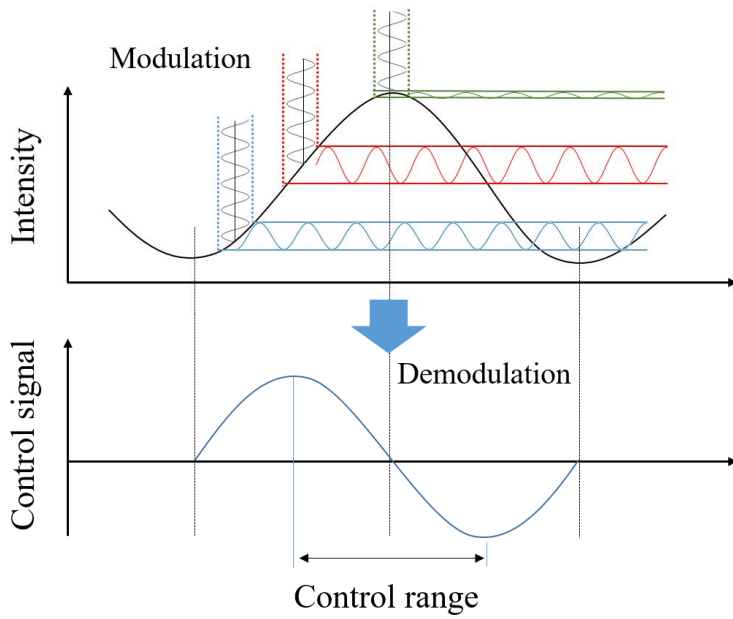


그림 2.8 LOCSET 방법의 개략도

LOCSET 방법을 수식적으로 표현하면 다음과 같다. 자가 동기화 (self-synchronous) LOCSET 방법의 경우 [25], i 번째 변조된 광의 전기장 E_i 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_i(t) = E_{i0} \cdot \cos(\omega_L t + \phi_i + \beta_i \sin(\omega_i t)) \quad (2)$$

여기서 E_{i0} 는 i 번째 변조된 광에 대한 진폭을 나타내며 ω_i 는 i 번째 변조된 광에 대한 변조 주파수 (Modulation frequency)이다. ω_L 과 ϕ_i 는 레이저 주파수 및 i 번째 레이저 광의 위상을 나타낸다. 식 (2)를 삼각함수 공식으로 정리하면 아래와 같다.

$$E_i(t) = E_{i0} [\cos(\omega_L t + \phi_i) \cos(\beta_i \sin(\omega_i t)) - \sin(\omega_L t + \phi_i) \sin(\beta_i \sin(\omega_i t))] \quad (3)$$

한편, 광 검출기에서 검출된 전류 i_{PD} 는 변조된 광의 간섭 신호로 식 (4)와 같이 표현된다. 여기서 N 은 변조된 광의 수를 나타내고, ϵ_0 와 μ_0 는 각각 자유공간에서의 자기장 및 전기장의 유전율을 나타내며, R_{PD} 와 A 는 광 검출기의 응답 및 광 검출기의 영역을 나타낸다.

$$i_{PD}(t) = R_{PD} \cdot A \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \left(\sum_{i=1}^N E_i(t) \right) \left(\sum_{j=1}^N E_j(t) \right) \quad (4)$$

이때, 제어 신호 (S_c)는 c 번째 변조 주파수 ω_c 에 대한 검출된 전류 i_{PD} 를 복조하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_c = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau i_{PD}(t) \cdot \sin(\omega_c t) dt \quad (5)$$

원래의 LOCSET 이론에서 $\omega_i = \omega_c$ 일 때, 적분시간 τ 는 $2\pi/\omega_i$ 와 $2\pi/|\omega_i - \omega_j|$ 보다 훨씬 길어야 한다. 식 (4)에서 $i \neq j$ 일 때 모든 i 와 j 는 \sin 함수와 \cos 함수의 직교성에 두 함수의 곱에 해당하는 성분들은 제거되며, 이를 통해 식 (5)는 식 (6)과 같이 유도될 수 있다.

$$S_i = R_{PD} \cdot \sqrt{P_i} \cdot J_1(\beta_i) \cdot \sum_{j=1}^N \sqrt{P_j} \cdot J_0(\beta_j) \cdot \sin(\varphi_j - \varphi_i) \quad (6)$$

여기서 φ_j 와 φ_i 는 각각 i 번째와 j 번째 위상 변조된 광의 위상을 나타낸다. 식 (6)은 $\varphi_j - \varphi_i$ 이 0이 될 때 제어 신호가 0이 되기 때문에, 이를 이용하면 광 강도 (intensity)가 가장 높은 지점을 확인할 수 있으며, 동시에 제어 신호가 계속 0이 되도록 피드백 제어를 하면 가간섭 펄스 결합이 가능하다.

제3장 실험 결과 및 분석

본 연구에서는 고출력 펄스 생성을 위한 다채널 가간섭 펄스 결합을 검증하기 위해, 간섭계를 이용하여 시간-공간 영역에서의 펄스 분할 및 결합을 실험적으로 수행하였고, 성능 평가를 위해 결과를 분석하였다. 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 효율의 문제점을 개선하기 위해 최종적으로 고효율을 위한 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈을 구현하였고, 결과를 분석하였다.

본 3장은 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 실험 내용과 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 실험내용을 기반으로 다음과 같이 4단계를 나누어 구성되었다.

- 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈 설계 및 구성
- LOCSET 방법 및 PID 제어
- 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 설계 및 구성
- 광섬유 기반 모듈의 가간섭 펄스 결합 제어 및 결과

다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 소형화 및 상용화를 위한 설계를 진행하였고 구현하였다. 구성된 모듈은 시간 영역에서 분할된 펄스들의 시간 지연에 대한 결과를 평가하였고, 이후 공간 영역에서 시간 지연된 펄스들의 분할 및 증폭을 통해 다시 하나의 펄스로 결합하는 실험을 수행하였다. LOCSET 방법을 통해 간섭 신호에 따른 제어 신호를 획득하였고, PID 제어를 통해 간섭 신호가 최대가 됨을 확인하였다. 그리고 이를 통해 가간섭 펄스 결합 모듈의 펄스 결합 평가 및 안정도를 평가하였다. 최종적으로 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 광 집속 시 발생하는 광삽입 손실의 문제점을 개선하기 위해 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈을 구현하였으며, 모듈의 펄스 결합 및 안정도를 평가하였다.

제1절 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈

1. 시간, 공간 영역에서의 가간섭 펄스 결합 모듈 설계 및 구성

기존의 DPA 모듈은 수 나노초 이상의 시간 지연을 위해 전체적인 광학 구성이 크며, 펄스의 분할과 결합이 별도의 광학계로 구성되는 한계로 인해 시스템이 크고 복잡하다. 이를 극복하기 위해 본 연구에서는 기존 연구와 달리 분할 모듈과 결합 모듈을 통합하여 모듈의 전체적인 크기를 줄이고, 다중 경로 간섭계의 원리로 소형 DPA 모듈을 설계하였다. 제안하는 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈은 시간 및 공간 영역에서 펄스가 분할되고, 광 증폭기를 통해 펄스가 증폭된 후 다시 하나의 펄스로 결합하는 모듈로, 전체적인 광학 구성의 크기를 줄임으로써 소형화가 가능하고 안정적인 가간섭 펄스 결합이 가능하다는 장점이 있다.

구성된 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈은 비교적 펄스들의 광경로가 복잡하고, 많은 광학 부품의 사용으로 인해 펄스들이 원활하게 진행되는지에 대한 평가가 필요하므로 그림 3.1과 같이 3D 설계 소프트웨어인 솔리드웍스 (SolidWorks)를 이용하여 설계를 진행하였다. 모듈의 소형화를 위해서 (0.70 m × 0.35 m) 크기의 다중 경로 간섭계를 기반으로 설계를 진행하였고, 좁은 공간에서 충분한 펄스 지연시간을 확보하기 위해서 M₃, M₅, M₈, M₉, M₁₁, M₁₂를 구성해 공간을 활용하였다.

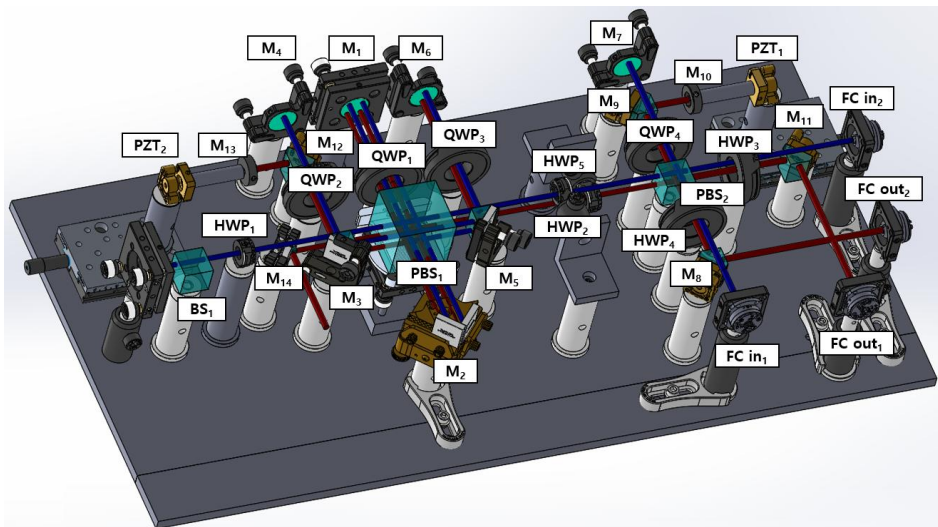


그림 3.1 다중 경로 간섭계를 이용한 DPA 모듈 설계

그림 3.2는 본 논문에서 실제로 구성한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 모습을 보여준다. 설계된 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈은 시간 영역에서 두 개의 펄스로 분할되고, 이후 공간 영역에서 펄스의 편광 상태에 따라 공간적으로 분할되고 각각의 펄스들이 광 증폭기를 통해 증폭된 후 다시 결합하는 모듈이다. 전체 광학 부품들의 상단부를 지나 시간 영역과 공간 영역에서 분할된 펄스들은 각각의 FC in을 통해 광 증폭기에 입사하며, 증폭된 후 서로 교차하여 FC out을 통해 다시 모듈에 입사한다. 이때, 증폭된 펄스들은 전체 광학계의 하단부를 통해 펄스 분할에서의 반대 경로로 진행한다. 증폭된 펄스들은 공간 영역의 DPA 모듈을 지나 결합하게 되고, 45° 회전된 반파장 위상 지연판 (HWP₅)에서 편광 방향이 바뀐다. 그러면 두 편광 상태의 펄스들은 펄스 분할에서의 경로와 서로 반대 경로를 겪게 되며, 이를 통해 시간 영역의 DPA 모듈에서 펄스들이 결합된다. 본 연구에서 사용한 광원은 그림 3.3과 같은 LASERNICS 사의 이터븀 기반의 광섬유 펨토초 펄스 레이저 (Ytterbium-doped fiber femtosecond pulse laser)를 사용하였다. 이 레이저는 모드-잠금된 레이저 (mode-locked laser)로 1042 nm의 중심 파장에서 발진하며, 분산을 통해 대략 10 ps의 펄스 폭을 가지고 있고, 평균 출력은 5.2 mW, 빔 크기는 3 mm이다. 또한 편광 유지 광섬유로 구성되어, 레이저 펄스의 편광은 선형 편광으로 정의되어 있다. 한편, 구성된 모듈에 사용되는 다양한 광학 부품은 레이저 사양에 맞추어 구성하였으며, 각 광학 부품들의 상세 사양은 표 1에 정리하였다.

광학 부품들의 정렬은 그림 3.4와 같은 광출력 측정 장치를 이용하여 진행하였다. 반파장 위상 지연판 (HWP₁)의 각도를 0°로 조절하고 편광 광분할기 (PBS₁)를 투과하는 p-편광의 출력을 최대로 하였을 때, 레이저의 평균 출력은 4.92 mW로 측정되었고, 반파장 위상 지연판 (HWP₁)의 각도를 45°로 조절하여 s-편광의 출력을 최대로 하였을 때, 레이저의 평균 출력은 4.88 mW로 측정되었다. 또한 반파장 위상 지연판 (HWP₁)의 회전을 통해 구성한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 시간 영역의 분할된 2개의 펄스는 그림 3.5와 같은 고속 광 검출기로 검출하여 오실로스코프 (oscilloscope)로 확인하였다.

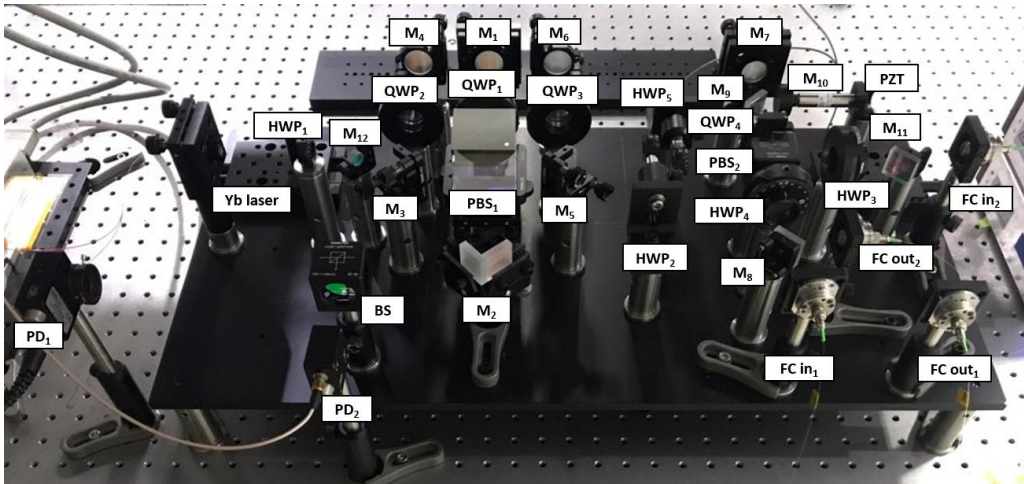


그림 3.2 실제로 구성된 다중 경로 간섭계 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈

표 1. 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈 구성을 위한 광학 부품의 사양

Component	Specification
Yb-laser	Wavelength: 1042 nm 10 picosecond, 반복률 20 MHz
Polarizer	Wavelength: 650 - 2000 nm Transmission: > 84.5%
PBS	Wavelength: 900 - 1300 nm Transmission p-polarized: 95% Reflectance s-polarized: 99%
HWP	Wavelength: 1030 nm AR coated
QWP	Transmission: 99.9%
Mirror	Reflectance: 99%
D-shape mirror	Reflectance: 97%
Fiber coupler	Fiber port, FC/APC, f: 18.4 mm Wavelength: 600 - 1050 nm
PZT	Moving distance : 0 - 100 μ m 5th order polynomials
PD ₁	Wavelength: 200 - 1100 nm, Rise time: 1 ns
PD ₂	Wavelength: 800 - 1700 nm Bandwidth: 5 GHz

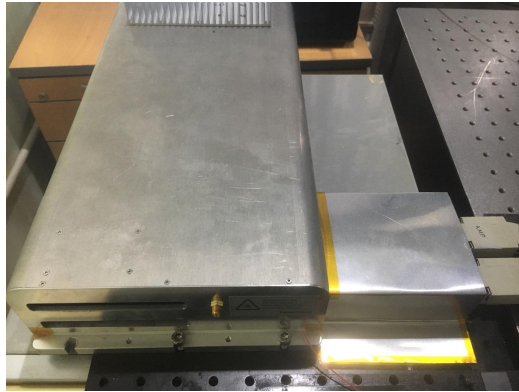


그림 3.3 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에 사용된 Yb-femtosecond laser

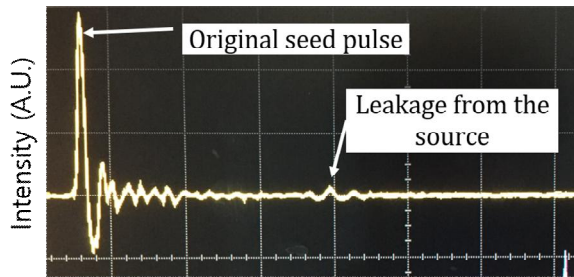


그림 3.4 광출력 측정 장치

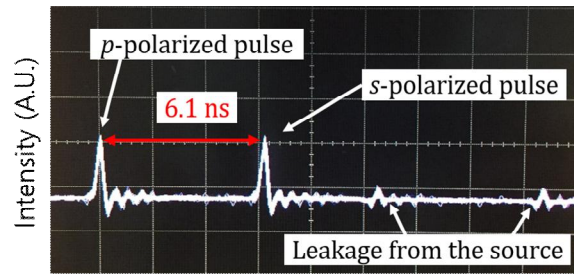


그림 3.5 펄스를 검출하기 위한 광 검출기

그림 3.6은 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 구성한 이후 시간 영역에서 분할된 펄스들을 보여준다. 그림 3.6 (a)는 광원에서 발진된 펄스를 나타내며, 레이저 자체에 내장되어 있는 광 검출기로 확인한 결과이다. 레이저의 주요 펄스의 뒤쪽에 보이는 작은 펄스들은 광원이 가지고 있는 누출 펄스 (leakage pulse)로 보인다. 그림 3.6 (b)는 반파장 위상 지연판 (HWP_1)를 적절히 조절하여 p-편광과 s-편광의 펄스를 생성 시킨 후, 시간 영역의 DPA 모듈을 지나 펄스들의 광경로 차이에 의해 시간 지연된 펄스들을 나타낸다. 그림 3.6 (b)에서 알 수 있듯이 시간 영역에서 펄스가 분할된 것을 확인할 수 있고, 펄스들 간의 시간 지연은 6.1 ns로 측정되었다. 이를 통해 2개의 펄스 사이에는 1.83 m의 광경로 차이가 있음을 확인하였다.



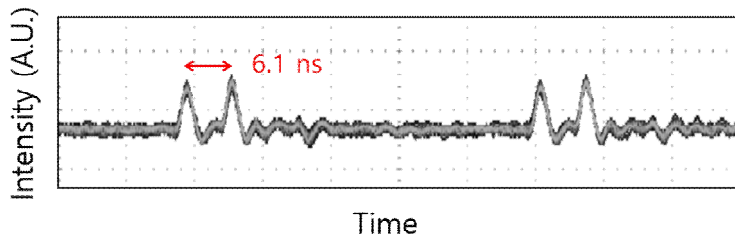
(a)



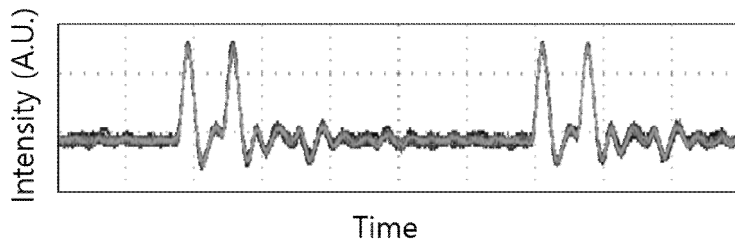
(b)

그림 3.6 시간 분할 모듈 통과한 결과 (a) 광원 자체의 펄스, (b) 시간 영역의 DPA 모듈을 통해 분할된 펄스

이후, 시간 지연을 갖는 2개의 펄스들은 그림 3.2의 반파장 위상 지연판 (HWP_2)을 통해 편광 광분할기 (PBS_2)를 지나게 되면, 각각 공간적으로 2개의 펄스들로 분할된다. 그림 3.7은 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 구성한 이후, 반파장 위상 지연판 (HWP_2)을 통해 공간 영역에서 분할된 펄스들을 보여준다. 그림 3.7 (a)는 공간 영역에서 분할된 펄스가 편광 광분할기 (PBS_2)를 반사한 이후의 펄스를 나타낸다. 공간적으로 분할되었기 때문에 펄스들 간의 시간 지연은 그대로 6.1 ns인 것을 확인하였다. 그림 3.7 (b)는 공간 영역에서 분할된 펄스가 편광 광분할기 (PBS_2)를 투과한 이후의 펄스를 나타낸다. 시간 영역에서 분할된 2개의 펄스가 공간 영역의 분할기를 지나면서 4개의 펄스로 분할되는 것을 확인하였다. 이를 통해 구성한 모듈에서 입사한 펄스가 시간 및 공간 영역에서 성공적으로 분할되었음을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 3.7 공간 분할 모듈 통과한 결과 (a) 공간 영역의 분할 채널 1에서의 펄스 모습,
(b) 공간 영역의 분할 채널 2에서의 펄스 모습

이후, 시간 및 공간 영역에서 분할된 펄스들은 그림 3.8과 같은 이터븀이 첨가된 광섬유 증폭기를 통해 각각 증폭된다. 구축된 광 증폭기는 편광 유지 광섬유를 통해 입력 및 출력광이 전달되도록 구성되었고, 광 증폭기의 사양은 다음과 같다. 광 증폭기를 가지고 실험한 결과, 평균 출력이 대략 100 mW 정도로 증폭됨을 확인하였다.



Item #	YDFA
Operating Wavelength Range	1032 nm ~ 1042 nm
Output Power (@ 3 dBm Input Power)	> 20 dBm
Output Power Stability	± 2% Over 24 Hours
Output Polarization	Linear Aligned to Slow Axis
Polarization Extinction Ratio	> 25 dB
Input / Output Fiber Type	PM980
Operating Temperature	15 to 30 °C
Input Voltage	220 V, 50 ~ 60 Hz
Input/Output Fiber Connectors	FC/APC

그림 3.8 본 연구에서 사용한 광 증폭기의 모습 및 성능 사양

2. LOCSET 방법 및 PID 제어 결과

다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 시간 및 공간 영역에서 분할된 펄스들을 결합하기 위해서, 본 연구에서는 변조 (modulation) / 복조 (demodulation) 기술을 이용하여 LOCSET 방법을 통해 제어 실험을 수행하였고, LOCSET 방법을 구현하기 위해 lock-in-amplifier를 사용하였다. lock-in-amplifier는 위상 민감 검출 (phase sensitive detection)을 이용하여 측정하고자 하는 신호와 잡음 (noise)을 분리하기 때문에 원하는 신호를 얻을 수 있는 특징이 있다. 그래서 lock-in-amplifier는 측정 신호가 특정한 주파수와 위상을 갖는 특징을 이용하여, 잡음으로부터 신호를 분리하여 잡음을 제거하고, 신호 대 잡음비를 증가시켜 미약하거나 잡음에 묻혀있는 신호까지 측정할 수 있다. 본 실험에서는 lock-in-amplifier의 위상 민감 검출 방법을 통해 특정한 변조 신호에 따라 해당하는 제어 신호 (control signal)를 획득하고, 이를 이용하여 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 보강간섭을 유지하기 위한 LOCSET 방법의 실험을 수행하였다.

다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 실험에 사용된 광 검출기로는 그림 3.9와 같은 Thorlabs사의 DET10A2를 사용하였고, lock-in-amplifier는 그림 3.10과 같은 Stanford Research System사의 SR830을 사용하였다. 광경로를 변조하기 위한 장치로 그림 3.11과 같은 PI사의 PZT (piezoelectric transducer)를 사용하였고, PID 제어기 (SIM 960), 가산 증폭기 (SIM 980)는 그림 3.12와 같은 Stanford Research System사 제품을 사용하였다. 실험에 사용된 광학 부품들은 표 1에 정리된 광학 부품들을 사용하여 구성되었으며, 그림 3.13은 실험에 사용된 LOCSET 제어 방법의 모식도를 나타낸다. 간섭 신호는 그림 3.2의 거울 (M_{12})에서 반사하고 나온 펄스들을 광분할기를 통해 광검출기 (PD_1)에서 획득하였고, 압전 구동기와 연결된 수동 스테이지는 가간섭 거리를 맞추어주기 위한 용도로 사용되었다.

먼저, LOCSET를 통한 제어 신호를 확인하기 위해 거울 (M_{10})에 구성된 압전 구동기에 미세하게 변조 신호를 인가한 이후에 광경로차를 변화시킨 경우, 그림 3.14와 같이 변조된 간섭 신호가 획득되었고, lock-in-amplifier에 의해 간섭 신호에 따른 제어 신호가 획득됨을 확인하였다. 이때, 간섭 신호와 제어 신호의 관계를 보면 간섭 신호가 최대일 때, 제어 신호가 0인 것을 확인할 수 있다. 이후, LOCSET을 통해 획득한 제어 신호를 피드백 제어에 이용하여 가간섭 펄스 결합을 수행하였다. 그림 3.15는 본 논문에서 구성한 다중 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 분할 영역을 통과해 분할되었던

펄스를 증폭시킨 후 결합 영역을 통과해 결합된 모습을 오실로스코프로 확인한 결과이다. 이를 통해 lock-in-amplifier에서 획득한 제어 신호가 PID controller를 통해 압전 구동기에 피드백되어, 그림 3.16과 같이 가간섭 펄스 결합이 이루어짐을 확인하였다. 또한, 가간섭 펄스 결합에 대한 장시간 안정도를 평가하기 위해서 대략 11시간 동안 제어를 수행하였다. 가간섭 펄스 결합 제어를 수행하기 이전의 간섭 신호는 시간에 따라 변화지만, 제어를 수행한 이후에는 보강간섭을 유지하면서 간섭 신호가 최대가 됨을 확인하였다. 구성된 다중 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 펄스 결합 안정도를 평가하기 위해 알란 편차 값 (Allan deviation)을 계산하였고, 그림 3.17과 같은 안정도를 얻었다. 간섭 신호의 안정도는 integration time이 1 s일 때 2.97×10^{-2} 를 가지며 integration time이 증가함에 따라 점차 높은 안정도를 갖는다. 그러나 레이저 출력을 보상하지 않은 경우, 100 s 이상에서 안정도가 다시 낮아지는 현상이 발생하는데, 이는 제어의 결과보다는 실제 레이저 광원이 가지는 시간에 따른 drift 효과이며, 레이저 출력 변화를 보정한 결과 간섭 신호의 안정도가 유지하는 것을 알 수 있었다.

한편, 본 논문에서 연구한 다중 경로 간섭계 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈에서 분할된 펄스가 결합 모듈에서 가간섭 결합하였을 때, 이론적인 펄스 결합 효율을 계산하기 위해 존스 행렬 (Jones matrix)을 이용하였다. 초기 레이저의 p-편광 펄스와 s-편광 펄스의 출력이 동일하게 2.6 mW일 때, 시간 및 공간 영역의 펄스 분할 모듈 이후에는 각각 2.34 mW, 1.88 mW로 감소하였으며, 이때 모듈의 펄스 분할 효율은 80%로 계산되었다. 그러나 분할된 펄스들이 각각 광 증폭기에 입사하면서 광섬유 커플러의 광삽입 손실로 인해 평균 출력이 50% 정도로 감소하였으며, 이는 이론적으로 설명하기에 한계를 가진다. 그래서 결과적으로 구성된 DPA의 펄스 결합 효율은 실험적으로 측정하여 계산하였고, 다음 식 (7)과 같이 각각의 펄스들의 출력 합과 결합 펄스의 출력 비율로 펄스 결합 효율 (η)을 정의하였다.

$$\eta = \frac{\alpha}{\beta} \cdot 100(\%) \quad (7)$$

여기서 α 는 펄스 결합 모듈의 펄스 결합 후 출력을 나타내며, β 는 분할된 펄스들의 출력 합을 나타낸다. 펄스 결합 효율을 평가하기 위해 각각 분할된 펄스들의 출력을 측정한 후, 펄스 결합 모듈 이후 결합 펄스의 출력을 측정하여 펄스 결합 효율을 계산하였고, 표 2와 같이 5초 간격으로 15번 반복 측정한 후, 평균값으로 정리하였다. 펄스

결합 효율은 73%로 평가되었고, 결합된 펄스의 출력은 45.25 mW로 측정되었다. 본 실험에서는 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 설계 및 구현하여 시간, 공간 영역의 분할과 펄스 결합을 수행하였으며, LOCSET 제어를 통해 가간섭 펄스 결합을 확인하였다.



그림 3.9 간섭 신호를 검출하기 위한 광 검출기



그림 3.10 LOCSET 제어에 사용한 lock-in-amplifier



그림 3.11 본 연구에서 사용한 PZT 및 PZT 제어기

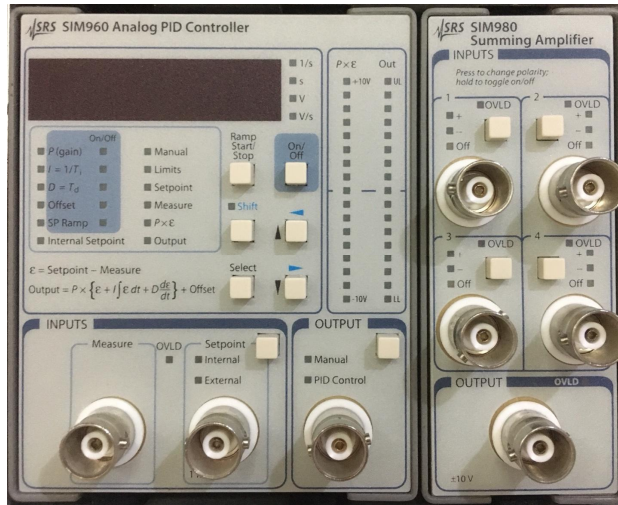


그림 3.12 LOCSET 제어에 사용한 PID controller 및 summing amplifier

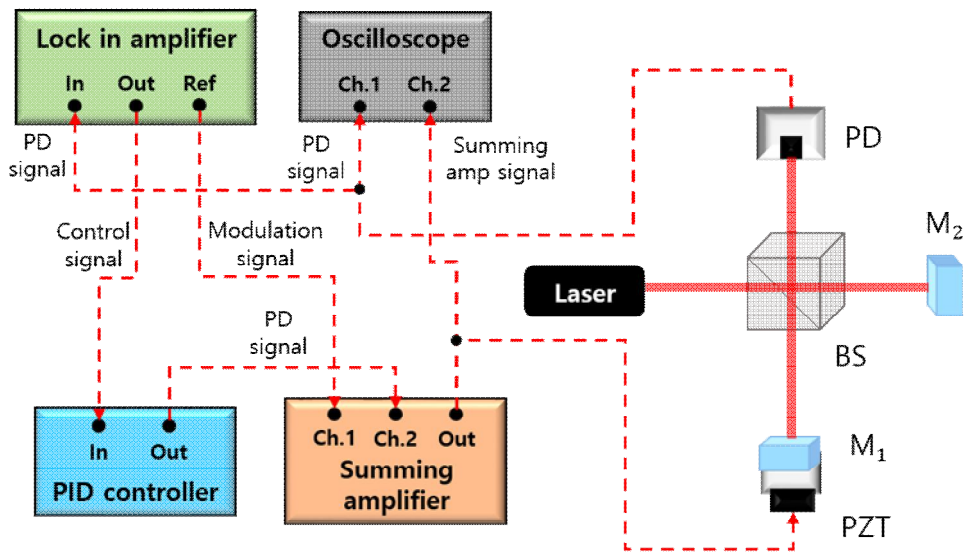


그림 3.13 LOCSET 제어 방법의 개략도

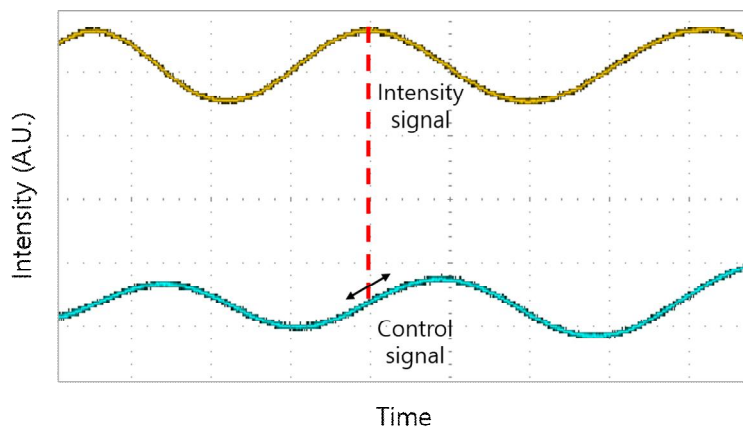


그림 3.14 간섭 신호 및 제어 신호의 결과

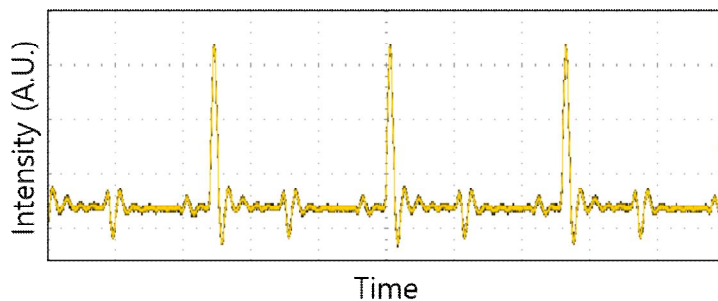
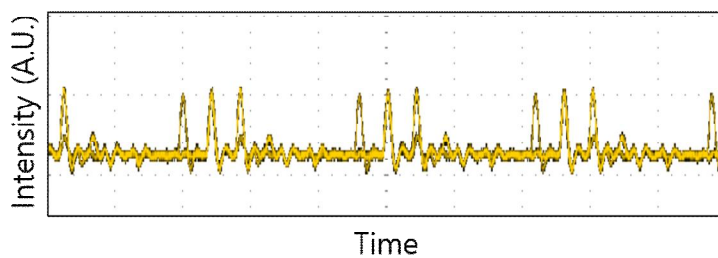


그림 3.15 가간섭 펄스 분할 및 결합

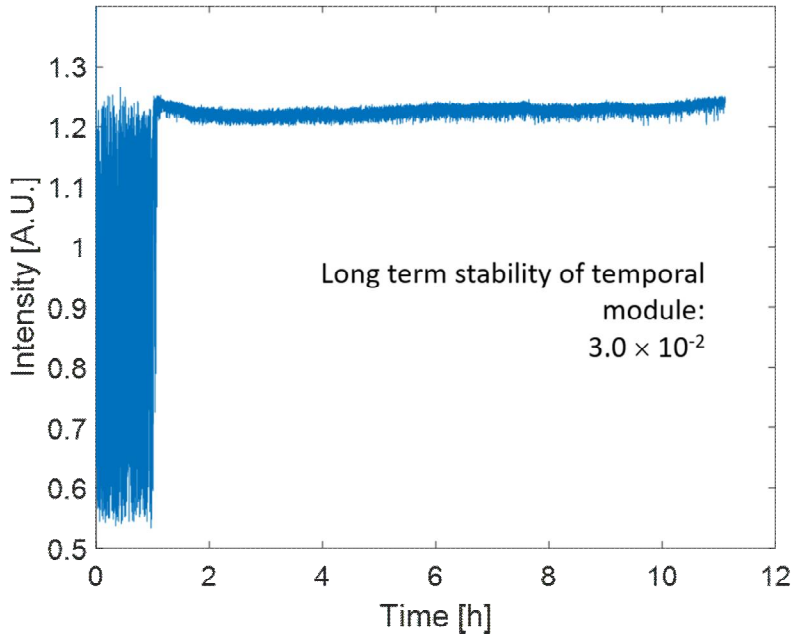


그림 3.16 PID 제어 전과 제어 후의 결과

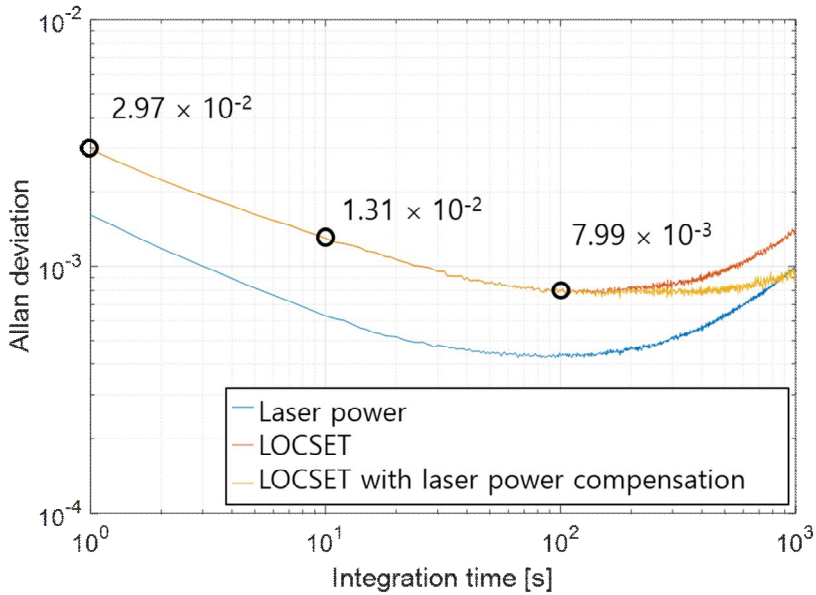


그림 3.17 DPA 모듈의 Allan deviation을 통한 가간섭 제어의 안정도 평가

표 2. 다중 경로 간섭계 기반의 가간섭 결합 모듈의 펄스 결합 효율 측정 결과

	채널 1의 펄스 출력 (mW)	채널 2의 펄스 출력 (mW)	결합 펄스 출력 (mW)	펄스 결합 효율 (%)
1	25.76	36.61	45.02	72
2	25.84	36.52	45.10	72
3	25.34	36.47	45.04	72
4	25.29	36.49	45.13	73
5	25.93	36.57	45.07	72
6	25.72	36.52	45.11	72
7	25.67	36.65	45.32	72
8	25.88	36.72	45.26	72
9	25.83	36.51	45.21	73
10	25.44	36.36	45.17	73
11	25.41	36.29	45.53	73
12	25.33	36.35	45.28	73
13	25.15	36.48	45.42	73
14	25.49	36.62	45.48	73
15	25.54	36.44	45.59	73
평균	25.57	36.51	45.25	73

제2절 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈

1. 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 구성

기존의 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈은 구성이 다소 복잡하고 부피를 많이 차지하기 때문에 정렬이 쉽지 않고 크기를 현저히 줄일 수 없는 문제가 있으며, 광 증폭기가 광섬유로 구성되어 있기 때문에 공기 중에서 광섬유로 레이저 펄스를 집속하는 부분에서 50% 이상의 광삽입 손실의 문제가 발생한다. 또한, 펄스 결합 시 사용되는 광학 부품들의 성능에 의해 결합 효율이 저하되며, 결합된 펄스 출력이 45 mW 수준으로 실제 고출력 레이저에 적용하기에 어려운 문제가 발생하였다. 이는 산업계의 응용에 있어서 한계가 생기고 고출력 펄스 생성을 위한 본 연구의 목표와 다르다. 그래서 본 연구에서는 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 광 증폭기를 사용했을 때 발생하는 효율의 문제점과 한계 등을 보완하기 위해서, 고효율을 위한 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈을 제안하고, 안정적인 가간섭 펄스 결합을 가능하게 하였다.

그림 3.18은 실제로 구성된 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 모습을 보여준다. 레이저에서 나온 펄스가 광 증폭기를 통해 증폭을 한 후, 편광 유지 광섬유 커플러에 의해 공간적으로 분할되며, 분할된 펄스들은 광 파장 다중 분할기를 지나게 된다. 이후, 976 nm 대역의 레이저 다이오드와 이터븀이 첨가된 광섬유를 통해 펄핑을 시켜 각각을 증폭시킨다. 증폭된 펄스는 광섬유 커플러를 통해 출력되고, 출력된 펄스들은 반파장 위상 지연판의 각도를 조절하여 각각 s-편광 펄스와 p-편광 펄스를 최대로 만든다. 이후, 압전 구동기와 연결된 수동 스테이지를 통해 전체적인 가간섭 거리를 맞추고, LOCSET 방법을 이용하여 분할된 펄스들은 안정적인 가간섭 펄스 결합을 하게 된다. 표 3은 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈에 사용된 광학 부품의 상세 사양을 나타낸다.

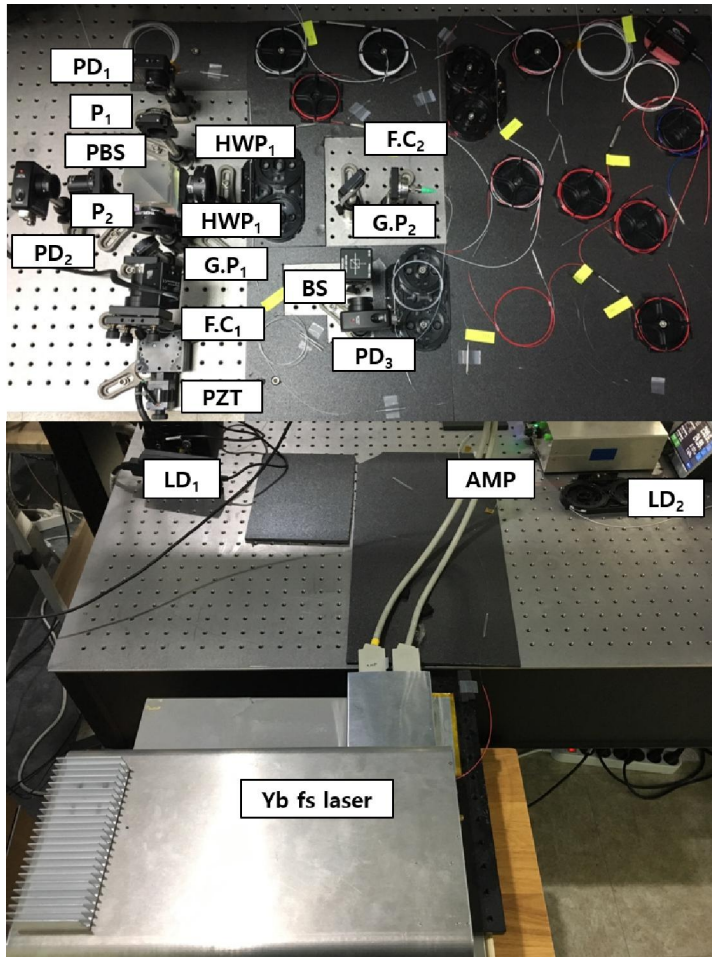


그림 3.18 실제로 구성된 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈

표 3. 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 구성을 위한 광학 부품의 사양

Component	Specification
Yb-laser	Wavelength: 1042 nm 10 picosecond, 반복률 20 MHz
PMC	Polarizer maintaining fused coupler Center wavelength: 1040 nm Fiber type: PM 980 fiber, 900 um Loose Tube
PBS	Wavelength: 900 - 1300 nm Transmission p-polarized: 95% Reflectance s-polarized: 99%
LD	Center wavelength: 975.5 nm (PM 976, FC/APC) Maximum output power: 1000 mW
YDF	Yb doped gain fiber (PM 980)
Fiber coupler	Fiber port, FC/APC, f: 18.4 mm Wavelength: 600 - 1050 nm
WDM	PM 980/1040 nm
HWP	Wavelength: 1030 nm AR coated Transmission: 99.9%
Polarizer	Wavelength: 650 - 2000 nm Transmission: > 84.5%
PZT	Moving distance : 0 - 100 μ m 5th order polynomials
PD	Wavelength: 200 - 1100 nm, Rise time: 1 ns

2. 광섬유 기반 모듈의 가간섭 펄스 결합 제어 및 결과

레이저에서 나온 펄스의 출력 향상을 위해 5.2 mW의 평균 출력을 가지는 펄스를 증폭기를 통해 54 mW로 증폭하였고, 편광 유지 광섬유 커플러를 통해 2 채널에서 21 mW 수준의 출력을 가지는 펄스를 생성하였다. 생성된 펄스들은 공간적으로 분할되었으며, 각각의 펄스들은 900 mW의 출력을 가지는 다이오드 펌핑 레이저를 이용한 광 증폭기를 통해 500 mW 이상의 평균 출력으로 크게 증폭되었다. 또한, 결합 효율을 높이기 위해서 광학 부품들의 수를 줄이고 광섬유 용착을 통해 광학 부품에서 발생하는 손실을 최소화하였다.

광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈은 광섬유로 구성되어 있기 때문에 공간적으로 분할된 펄스들의 광경로차를 광섬유의 길이로 조절하는 것에 한계가 있다. 그래서 본 연구에서는 펄스들의 결합을 위해서 압전 구동기와 수동 스테이지를 이용하여 광경로를 조절할 수 있도록 구성하였고, 광 검출기를 통해 간섭 신호를 획득하였으며 레이저 및 광 증폭기 자체의 출력 변화를 확인하기 위해 광섬유 커플러의 앞단에 각각 광 샘플러 (sampler)를 설치하여 작은 양의 반사광을 광분할기 (BS)를 통해 광 검출기로 획득하였다. 가간섭 펄스 결합을 위해서 공간적으로 분할된 펄스들 사이의 간섭 구간을 수동 스테이지를 통해 간섭 신호가 최대가 되는 지점으로 이동시켰고, LOCSET 방법을 적용하여 그림 3.19와 같이 간섭 신호에 따른 제어 신호를 획득하였다. 이후, 장시간 안정도 평가를 위해 대략 14시간동안 제어를 수행하였고, 제어 신호를 PID 제어기를 이용하여 압전 구동기에 피드백한 결과, 그림 3.20과 같이 제어 전에는 간섭 신호가 외부 환경에 의해 변화하다가 제어 후 보강간섭이 유지됨을 확인하였다. 제어 전 상태의 광 검출기의 전체 세기 변화량은 5.64에 대해 제어 후 제어 내에서의 세기 변화는 0.045의 변화량을 보였고, 이때 안정도는 0.8×10^{-2} 를 가졌다.

최종적으로 구성한 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 펄스 결합 안정도를 평가하기 위해 알란 편차값 (Allan deviation)을 계산하였다. 알란 편차값은 시간에 따라 변화하는 신호에 대해 적분 시간 (integration time)을 이용하여 안정도를 정량적으로 평가하는 방법으로, 본 연구에서는 이를 이용하여 그림 3.21과 같이 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 펄스 결합 안정도를 획득하였다. 펄스 결합 안정도는 획득되는 간섭 신호의 안정도로 평가하였으며, 적분 시간이 1초일 때 1.09×10^{-3} , 10초일 때 2.31×10^{-3} , 100초일 때 2.03×10^{-3} 의 안정도를 획득하였다. 이때, 10 s까지 적분 시간이 증가함에 따라 안정도가 점점 낮아지는 현상이 발생하는데, 이는 외부 환경 등의 영향

으로 인해 PID 제어 이후의 신호가 주기적으로 흔들리고 있기 때문이라고 판단되며, 100 s 이후는 integration time이 증가함에 따라 점차 안정도가 높아지는 것을 확인하였다. 또한 각각의 채널에 대해 출력을 측정 한 결과 평균 출력으로 460 mW, 530 mW 이상으로 확인되었으며, 분할된 펄스가 결합 모듈에서 가간섭 결합하였을 때, 결합 펄스의 출력은 ~830 mW로 측정되었으며, 결합 효율은 80% 이상임을 확인하였다.

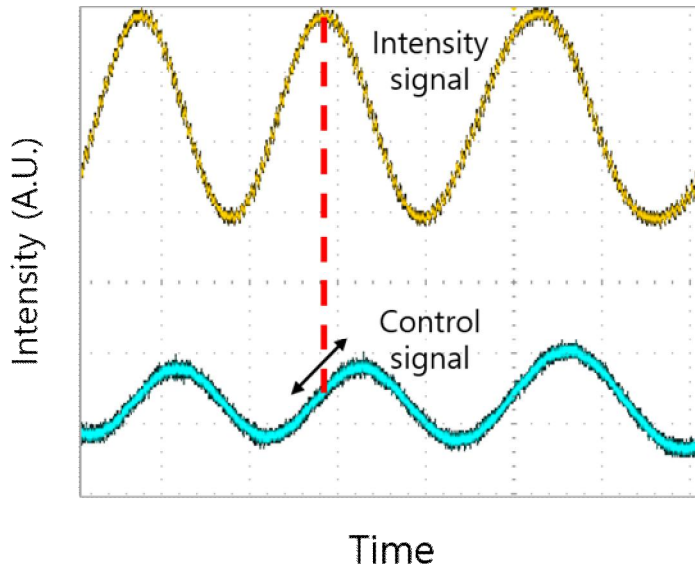


그림 3.19 간섭 신호 및 제어 신호의 결과

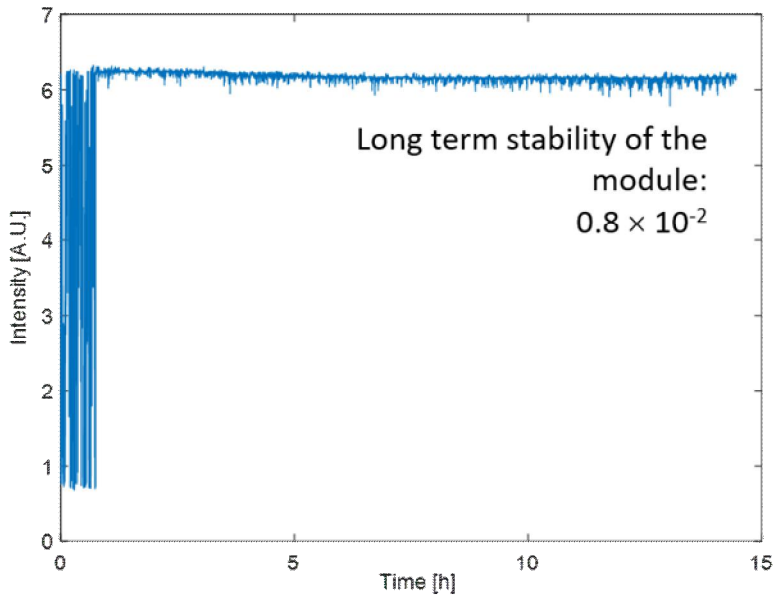


그림 3.20 PID 제어 전과 제어 후의 결과

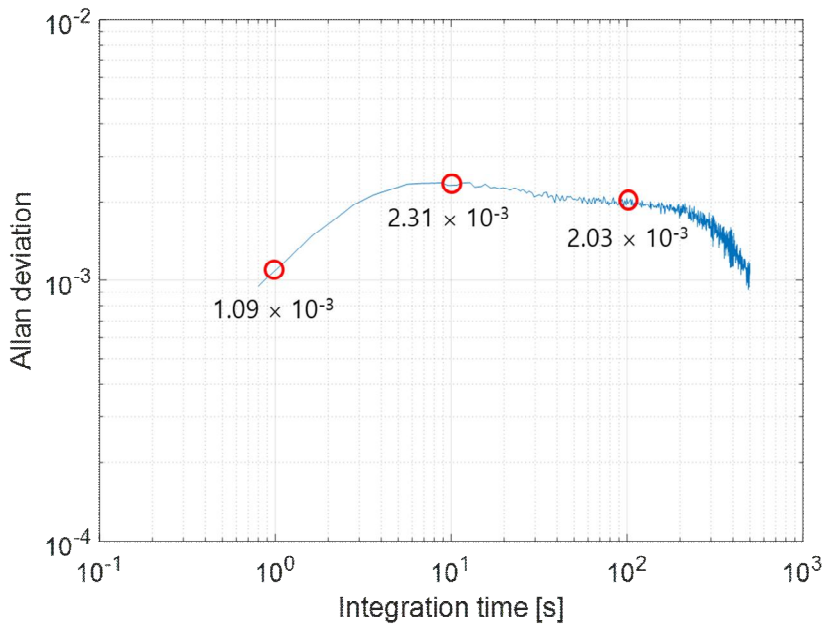


그림 3.21 PID 제어의 Allan deviation을 통한 안정도 평가

제4장 고찰 및 논의

본 논문에서는 고출력 펄스 생성을 위해 다채널 가간섭 펄스 결합을 위한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 구성하였고 이를 실험적으로 검증하였다. 또한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 광 증폭기로 집속할시 발생하는 광 집속 효율의 문제점을 개선하기 위해 고효율을 위한 광섬유 기반의 가간섭 펄스 모듈을 구현하였고, 분석하였다. 본 장에서는 본 논문에서 제안, 개발한 DPA 모듈에 대한 성능 평가와 안정도에 영향을 미치는 요인, 응용에 대하여 고찰한다.

제1절 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈

기존의 연구들에서는 수 나노초 이상의 시간 지연과 공간적으로 펄스를 분할하기 위해 시간 및 공간 분할 영역에서 모듈들이 각각 설계되었다. 또한, 가간섭 펄스 결합을 위해 동일한 크기의 간섭계를 필요로 하여 전체 시스템이 크고 복잡한 문제가 발생하였으며, 이로 인해 소형화 및 상용화에 한계를 가지고 있었다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 설계하고, 펄스 분할 영역과 가간섭 결합 영역이 하나의 모듈에서 이루어질 수 있는 시스템을 제안하였다. 이를 실제로 구현한 결과, 전체 시스템의 크기는 $0.35\text{ m} \times 0.70\text{ m}$ 로 전체 구성이 소형화됨을 확인하였다. 시간 및 공간 분할 영역에서 펄스들이 성공적으로 분할되었고, 펄스들의 안정적인 가간섭 결합을 위해 LOCSET 제어 방법을 사용하였다. 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈의 정량적인 안정도를 평가하기 위해 알란 편차값을 계산하였고, integration time이 1초에서 2.97×10^{-2} 의 안정도를 가졌으며, integration time이 증가함에 따라 안정도가 높아졌다. 하지만 100초 이상부터 안정도가 낮아짐을 확인하였는데, 이는 실제 레이저 광원이 가지는 시간에 따른 출력의 흔들림으로, 레이저 출력 변화를 보상한 결과 어느 정도 안정도를 유지하는 것을 확인하였다. 따라서 안정적인 가간섭 결합을 위해 레이저 출력 안정화가 필수적이고 외부 환경 제어가 필요하다.

다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈은 많은 광학 부품들의 사용으로 인해 광학 시스템의 구성이 다소 복잡하고 정렬이 어려운 문제가 발생하였다. 최종적으로 계산된 펄스 출력 결합 효율은 약 30% 정도로 계산되었고, 이는 펄스들이 많은 광학 부품들을 통과하기 때문에 출력이 저하되고 광세기가 저하되는 문제점이므로 이를 해결

하기 위해 각 광학 부품 등의 투과, 반사율을 높일 필요가 있다. 한편, 전체 광학 구성에서 효율을 저하시키는 가장 중요한 요인은 광 증폭을 위한 광섬유 커플러에 접속되는 펄스의 광삽입 손실로, 이는 광학 정렬에 크게 영향을 받으며 본 실험에서는 이로 인해 출력이 50%로 감소하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈을 상용화하기 위해서는 이러한 광삽입 손실을 최소화하여야 하며, 이를 위해 광 증폭기로 광섬유 기반이 아닌 bulk 타입의 광 증폭기를 사용해야 한다. bulk 타입의 광 증폭기를 이용하면, 이러한 광삽입 손실을 크게 줄일 수 있으며, 이를 통해 70% 이상의 펄스 결합 효율을 달성할 수 있을 것으로 예상된다.

이와 더불어, 광섬유 기반의 광 증폭기를 DPA 모듈에 사용하는 경우에는 전체 광학 구성을 광섬유 기반으로 변경하여 효율 저하를 차단해야 하며, 이를 위해 전체 시스템이 광섬유 융착을 통해 구성되어야 한다. 이 경우, 광학 부품에서 발생하는 손실을 최소화할 수 있고 또한, 펄스 출력 결합 효율을 높일 수 있을 것으로 생각된다.

제2절 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈

본 논문에서는 광섬유로 구성된 광 증폭기를 위한 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈을 제안하여, 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에서 가장 큰 요인으로 발생하는 광섬유 커플러 효율의 문제점을 개선하였다. 제안하는 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈은 다중 경로 간섭계 기반의 소형 DPA 모듈에 비해 비교적 광학 구성이 간단하기 때문에 소형화에 장점이 있고, 높은 펌프-신호 변환 효율에 의해 높은 증폭 효율을 가지므로 상용화가 가능함을 확인하였다.

분할된 펄스들의 가간섭 결합을 위해 LOCSET 방법을 사용하였고, 안정도는 0.8×10^{-2} 를 가지는 것을 확인하였다. 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 안정도를 평가하기 위해 알란 편차값을 계산하였고, integration time이 1초에서 10초까지 증가함에 따라 안정도가 낮아짐을 확인하였다. 안정도가 낮아지는 이유는 PID 제어 후의 간섭 신호가 주기적으로 흔들리고 있기 때문이라고 판단되며, 압전 구동기가 주기적으로 흔들리는 원인은 분명하게 파악되지 않았지만, 외부 환경에 의한 영향과 압전 구동기의 오작동에 의한 원인으로 판단된다. 이를 해결하기 위해 향후 그림 4.1과 같이 변조 및 제어를 광섬유단에서 전기 광학 변조기 (electro-optic modulator)와 링 구조의 압전 구동기 (R-PZT)를 통해 수행하고, 광섬유 부분의 환경을 제어한다면 전체 시스템의 안정도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 전체 광학 구성이 광섬유 기반이기 때

문에 각 광섬유를 융착할 시 발생하는 출력 손실을 최소화하여야 하며, 특히 이득 광섬유와 일반적인 광섬유 사이의 융착 과정에서 손실이 최소화되도록 각별한 고려가 필요하다. 이와 더불어 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈은 (1xN) 분할기를 통해 공간적으로 N개의 펄스로 분할할 수 있을뿐더러 반대로 이들을 결합할 수 있는 가능성이 있기 때문에 전체 시스템에 심각한 손상 없이 높은 에너지를 가지는 펄스 생성이 가능할 것으로 판단된다.

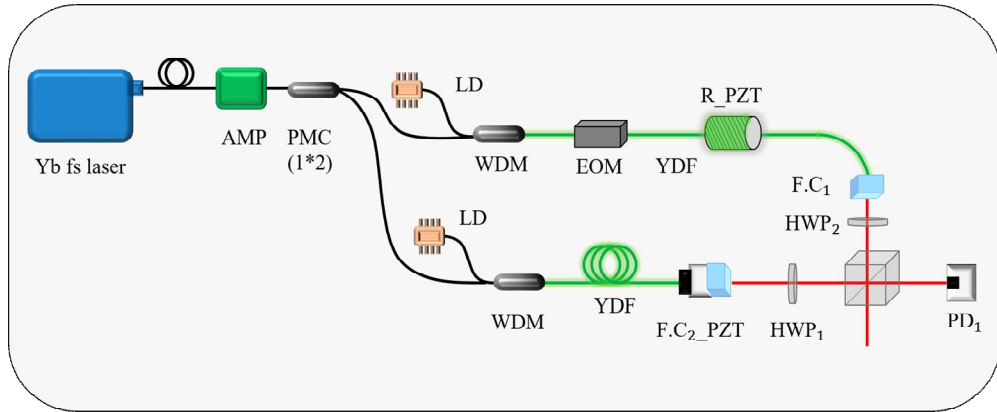


그림 4.1 EOM과 R-PZT가 추가된 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈 구성도

제5장 결론

본 논문에서는 펄스 레이저의 펄스를 고출력 펄스로 생성시키기 위해 단일 처프 펄스 증폭 방법이 아닌, 가간섭 펄스 결합 방법을 기반으로 한 분할 펄스 증폭 방법에 대한 연구를 수행하였다. 기존의 분할 펄스 증폭 방법은 시간, 공간상 펄스 분할 및 결합 영역의 모듈이 각각 설계되었고, 결합 영역의 모듈 또한 분할 영역의 모듈과 동일한 크기의 간섭계가 구성되어야 하므로, 전체 시스템이 커지는 문제가 발생하여 상용화에 어려움이 있었다. 그래서 본 논문에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 소형 펄스 분할/결합 모듈 (DPA 모듈)을 제안하였다. 다중 경로 간섭계를 기반으로 한 소형 DPA 모듈을 설계, 제작함으로써 펄스 분할과 증폭, 결합을 동시에 수행할 수 있는 모듈을 제안하였고, 기존의 DPA 모듈보다 전체 시스템 크기를 줄였다. 펄스들의 가간섭 결합을 위해 LOCSET 제어 방법을 이용하여 간섭 신호에 따른 제어 신호를 획득하였고, PID 제어를 수행하였다. 장시간 가간섭 펄스의 안정도를 평가하기 위해 알란 편차 값을 계산하였으며, 레이저 출력 변화를 보정한 결과 integration time이 증가함에 따라 일정한 안정도가 유지되는 것을 확인하였다. 이때, 광원의 평균 출력은 5.2 mW, 분할된 경우 각각 1.88 mW와 2.34 mW였으며, 증폭된 이후의 출력은 각각 25.57 mW와 36.51 mW였다. 최종적으로 가간섭 펄스 결합 이후의 평균 출력은 45.25 mW로, 설계 구성한 DPA 모듈의 결합 효율은 약 73%였다. 하지만 광섬유 커플러로 광 증폭기에 광을 집속시킬시 손실이 대략 50%로 발생하여, 실제 펄스 결합 효율은 30 % 수준이었으며, 이를 개선하기 위해 광학 구성을 광섬유 기반으로 변경하였다.

광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈은 전체 구성을 광섬유 용착을 통해 구성하여 손실을 최소화하였고, 마찬가지로 안정적인 가간섭 펄스 결합을 위해 LOCSET 제어 방법을 이용해 간섭 신호에 따른 제어 신호를 획득하여 PID 제어를 수행하였다. 이때, 각 채널에서 증폭된 펄스들의 평균 출력은 460 mW와 530 mW로 측정되었고, 가간섭 펄스 결합을 수행한 결과 최종적으로 830 mW의 평균 출력을 획득하여, 펄스 결합 효율은 80% 이상임을 확인하였다. 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 모듈의 안정도를 평가하기 위해 알란 편차값을 계산하였고, integration time이 1초에서 10초까지 증가함에 따라 안정도는 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 PID 제어 결과, 제어 후의 간섭 신호가 주기적으로 흔들리고 있고, 압전 구동기의 오작동 때문이라고 판단되며, 추가적인 실험을 통해 외부 환경을 제어하고 PID 제어 이후의 안정도 평가를 다시 수행해야 할

것으로 판단된다. 향후 전기 광학 변조기와 링 구조의 압전 구동기를 통해 광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 연구를 수행한다면, 높은 평균 출력 및 펄스 에너지를 바탕으로 기존 시장에 상용화된 전 증폭기 (pre-amplifier)를 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

【참고문헌】

- [1] Willam M. Steen and Jyotirmoy Mazumder. “Laser Material Processing”, 4th, Spaingner, London Dordrecht Heidelberg New York (2010).
- [2] H. K. Tonshoff, F. Alvensleben, A. Ostendprf, G. Kamlage and S. Nolte, “Micromachining of Metals Using Ultrashort Laser Pulses”, International Journal of Electrical Machining, 4, 1-6, (1999).
- [3] R. L. Fork, B. I. Greene, and C. V. Shank, “Generation of optical pulses shorter than 0.1 psec by colliding pulse mode-locking”, Appl. Phys. Lett. 38 (9), 617 (1981).
- [4] P. F. Moulton, “Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃”, J. Opt. Soc. Am. B. 3 (1), 125 (1985).
- [5] C. P. Barty, C. L. Gordon Iil, and B. E. Lemoff, “Multiterawatt 30-fs Ti:sapphire laser system”, Opt. Lett. 19 (18), 1442 (1994).
- [6] R. Paschotta, J. Nilsson, A. C. Tropper, and D. C. Hanna, “Ytterbium-doped fiber amplifiers”, IEEE Journal of Quantum Electron. 33 (7), 1049 (1997).
- [7] D.Strickland and G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses”, Opt. Commun. 56, 219 (1985).
- [8] C. P. J. Barty, “The Nexawatt: A Strategy for Exawatt Peak Power Lasers Based on NIF and NIF-like Beam Line”, J. Phys. Conf. Ser. 717, 012086 (2016)
- [9] T. Y. Fan, “Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources”, IEEE. 11 (3), 567 (2005).
- [10] V. Daneu, A. Sanchez, T. Y. Fan, H. K. Choi, G. W. Turner and C. C. Cook, “Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser array in an external cavity”, Opt. Lett. 25 (6), 405 (2000).
- [11] P. O. Minott and J. B. Abshire, “Grating rhomb diode laser power combiner”, Proc. SPIE Opt. Technol. Space Commun. Syst. 756, 38 (1987).
- [12] J. A. R. Rall, P. L. Spadin, R. K. Zimmerman, and W. Maynard, “Test results of a diffraction grating beam combiner”, Free-Space Laser Commun. Technol. 1218, 264 (1990).

- [13] Xi Zhang, Shanghong Zhao, Xingchun Chu and Weihua Zhao, “New method of incoherent beam combining for fiber laser based on concave grating”, *Opt Las.* 48, 353 (2012).
- [14] C. D. Nabors, “Effect of phase errors on coherent emitter arrays”, *Appl. Opt.* 33, 2284 (1994).
- [15] L. Liu, Y. Zhou, F. kong, Y. C. Chen and K. K. Lee “Phase locking in a fiber laser array with varying path lengths”, *Appl. Phys. Lett.* 85 (21), 4837 (2004).
- [16] M. Kienel, M. Müller, A. Klenke, T. Eidam, J. Limpert and A. Tünnermann, “Multidimensional coherent pulse addition of ultrashort laser pulses”, *Opt. Lett.* 40, 4, 522 (2015).
- [17] Youichi Bitou, “Phase-shifting interferometry with feedback control using heterodyne phase detection”, *Opt. Lett.* 33 (16), 1777 (2008).
- [18] T. M. Shaya, J. T. Bakerb, Anthony D. Sancheza, C. A. Robina, Lt. C. L. Vergiena, C. Zerinquea, Anthony D. Sancheza, D. Gallantb, Chunte A. Lua, Benjamin Pulforda, Capt. T. J. Brondera and Arthur Lucerob “High power phase locking of a fiber amplifier array”, *Proc. of SPIE Vol. 7195, 71951M* (2009).
- [19] Zhou, S., Ouzounov, D. G., and Wise, F. W. “Divided-pulse amplification of ultrashort pulses”, *Opt. Lett.* 32 (7), 871 (2007).
- [20] M. Kienel, A. Klenke, T. Eidam, S. Hädrich, J. Limpert, and A. Tünnermann, “Energy scaling of femtosecond amplifiers using actively controlled divided-pulse amplification”, *Opt. Lett.* 39, 1049 (2014).
- [21] T. Eidam, M. Kienel, A. Klenke, J. Limpert and A. Tünnermann, “Divided-pulse amplification for terawatt-class fiber laser”, *Eur. Phys. J. Special Topics* 224 (13), 2567 (2015).
- [22] M. Kienel, A. Klenke, T. Eidam, M. Baumgartl, C. Jauregui, J.Limpert, and A. Tünnermann, “Analysis of passively combined divided-pulse amplification as an energy-scaling concept”, *Opt. Express* 21 (23), 29031 (2013).
- [23] T. M. Shaya, “Theory of electronically phased coherent beam combination without a reference beam”, *Opt. Express* 14 (25), 12188 (2006).
- [24] T. M. Shaya, Vincent Benhamb, Lt. Justin Spring, Capt. Benjamin Warda, F. Ghebremichaela, Mark A. Culpeppera, Anthony D. Sancheza, J. T. Bakerc, Sgt.

- D. Pilkingtona and Richard Berdinea, “Self-reference locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging,” US Air Force, US Patent 7,233,433 (2007).
- [25] T. M. Shay et al., “First experimental demonstration of self synchronous phase locking of an optical array”, Opt. Express. 14 (25), 12015 (2006).

이 력 서

성 명 : 장 진 (張 進)

생 년 월 일 : 1992년 7월 8일(양력)

출 생 지 : 군 산

주 소 : 광주광역시 동구 화산로 350번길 18 동산타워 1101호

학 력

2008.3. - 2011.2. 국제고등학교 졸업

2011.3. - 2017.2. 조선대학교 광기술공학과 학사 졸업

2017.3. - 2019.2. 조선대학교 광기술공학과 석사 졸업

학위 논문

“고출력 펄스 생성을 위한 다채널 가간섭 펄스 결합 연구,” 석사학위논문, 조선대학교 (2019)

국외 저널

- [1] J. Jang, J. W. Jeon, J. S. Kim and K. -N. Joo, “Efficient and Exact Extraction of the Object Wave in Off-axis Digital Holography,” Current Optics and Photonics, Vol. 2(6) (2018) in press.
- [2] J. Jang, H. W. Jeong and K. -N. Joo, “Temporal and spatial coherent pulse combining by multi-path interferometric scheme”, Int. J. Pre. Eng. Manuf. (2019) in press.

국내 · 외 학회 발표

- [1] 장진, 정희원, 주기남, “펨토초 레이저의 가간섭 펄스 결합 연구”, 한국광학회 하계학술발표회 2017.
- [2] Jin Jang and Ki-Nam Joo, “Development of coherent pulse combing module”, ASPEN 2017.
- [3] 장진, 정희원, 주기남, “펨토초 레이저의 가간섭 펄스 결합 연구”, 한국광학회 동계학술발표회 2018.
- [4] Jin Jang and Ki-Nam Joo, “Development of coherent pulse combing module”, CLEO 2018.
- [5] 장진, 주기남, “광섬유 기반의 가간섭 펄스 결합 연구”, 한국광학회 하계학술발표회 2018.
- [6] 장진, 주기남, “광섬유 기반의 고출력 펄스 생성을 위한 가간섭 펄스 결합 연구”, 한국정밀공학회 추계학술발표회 2018.