

비열 초미세 가공용 펨토초 레이저
개발을 위한 칩 펄스 증폭 시스템에
관한 연구

연세대학교 대학원
전기전자공학과
황 정 민

비열 초미세 가공용 펨토초 레이저
개발을 위한 칩 펄스 증폭 시스템에
관한 연구

연세대학교 대학원

전기전자공학과

황 정 민

**비열 초미세 가공용 펨토초 레이저
개발을 위한 칩 펄스 증폭 시스템에
관한 연구**

지도교수 최우영, 전영민

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2012년 1월 일

연세대학교 대학원

전기전자공학과

황 정 민

황정민의 석사 학위논문으로 인준함

심사위원 최우영 인

심사위원 최현용 인

심사위원 전영민 인

연세대학교 대학원

2012 년 1 월 일

감사의 글

2010년 백호랑이의 해때 새내기 대학원생으로 입학한지 얼마되지 않아 2012년 흑룡의 해가 환하게 밝았습니다. 2년 동안의 대학원 및 연구소 생활에 많은 도움을 주신 분들께 깊은 감사를 드립니다. 먼저 항상 나와 함께하시고, 나를 사랑하시고, 나의 모든 길을 이끌어 주신 하나님께 감사와 영광을 돌립니다. 그리고, KIST의 연구소에 들어와 이 논문을 위해서 광학 이론에 대한 전반적인 지식을 설명해주시고, 광학 실험을 할 수 있도록 물질적으로 아낌없는 지원을 해주시며 전반적인 지도를 해주신 전영민 박사님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 학교에 잘 나오지 못해도 항상 저를 반갑게 맞아주시고, 저의 근황과 실험에 대해 깊은 관심을 가져주신 연세대학교의 지도교수님이신 최우영 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 바쁜 일정에도 불과하고 논문심사를 위해 시간을 할애해 주신 최현용 교수님께도 감사를 드립니다. KIST에서 모든 결제를 도맡아주신 센터장이신 우덕하 박사님, 그 밖에 저에게 관심을 가져주셨던 이석박사님, 변영태 박사님, 김신근 선생님, 김재현 박사님, 이택진 박사님께도 감사를 드립니다. KIST 연구실 생활 속에서 저의 NAVER 지식인 및 생활의 활력을 불어넣어 주신 지웅이형, 저의 사수로서 많이 부족했던 부분을 채워주셨던 하민이형, 언제나 저의 배를 포만감을 부르게 해주신 여상학박사님, 광학 지식인이 되어주셨던 두성이형, 그리고 경현이형, 지석이형, 보라누나, 정호, 이영주씨께도 감사를 드립니다. 그리고 관심 가져주시고, 도움을 주신 대학원의 연구실 형들께도 감사를 드립니다. 그리고 대학 생활 가운데 기도와 격려로 함께해준 믿음의 동역자인 08-09 대표단팀들과 05 삼겹줄 동기들, 간사님께도 감사를 드립니다. 아낌없이 기도와 격려로 섬겨주셨던 푸른교회의 전도사님과 간사님, 2011년 행정팀, 86또래 친구들, 영아부의 간사님과 선생님께도 감사를 드립니다. 마지막으로 저의 사랑하는 부모님들, 제가 목표로 나아가는 길에 모든 부분에서 마음과 물질로 도와주시고, 항상 저를 사랑해주시고 믿어주시고 기도해주셔서 감사합니다. 여기에 일일이 이름을 나열할 수 없지만, 제가 이제껏 살아오면서 도움을 받았던 모든 분들께 머리 숙여 감사를 드립니다.

“나의 나된 것은 하나님의 은혜입니다.”

차 례

그림 차례	iv
표 차례	viii
국문 요약	ix
제 1 장 서론	1
제 2 장 기본 이론 및 설계	5
2.1. 첩 펄스 증폭 시스템의 원리	5
2.2. 펄스 확장기의 설계 이론	7
2.2.1. 군속도 분산(Group Velocity Dispersion)	7
2.2.2. Treacy-Type 펄스 확장기	9
2.2.3. Martinez-Type 펄스 확장기	12
2.2.4. Öffner-Type 펄스 확장기	15
2.3. 광섬유 증폭기의 특성	18
2.3.1. 광섬유에 첨가된 Ytterbium 이온	18
2.3.2. 첩 펄스 증폭기용 광섬유	20
2.4. 펄스 폭 측정 방법	22
2.5. CPA 시스템 설계	24
2.5.1. Fiber Desk Program	24
2.5.2. 펄스 확장기 설계	26
2.5.3. 광섬유 증폭기 설계	28

2.5.4. 펄스 압축기 설계	31
2.5.5. CPA 시스템 구조도 및 설계	32
제 3 장 실험 장치 및 방법	33
3.1. 특성 측정용 실험 장치	34
3.2. Treacy-Type 펄스 확장기 설계 및 제작	36
3.3. Martinez-Type 펄스 확장기 설계 및 제작	38
3.4. Öffner-Type 펄스 확장기 설계 및 제작	41
제 4 장 실험결과 및 분석	44
4.1. Treacy-Type 펄스 확장기 특성 측정 및 분석	45
4.2. Martinez-Type 펄스 확장기 특성 측정 및 분석	51
4.3. Öffner-Type 펄스 확장기 특성 측정 및 분석	57
4.4. Ytterbium을 사용한 광섬유 증폭기 제작 및 특성 분석	62
제 5 장 결론	65
참고문헌	66
영문 요약	70

그림 차례

그림 1.1 피코초 미만의 펄스와 펨토초 펄스를 이용한 마이크로 가공	2
그림 1.2 펨토초 레이저 비열 초미세 녹색 가공기술 연구내용	3
그림 2.1 칩 펄스 증폭 기술 개념도	5
그림 2.2 펨토초 레이저를 이용한 칩 펄스 증폭 시스템 구성도	6
그림 2.3 반사형 회절격자	9
그림 2.4 반사형 회절격자의 광경로	10
그림 2.5 회절격자 쌍을 사용한 펄스 확장기	11
그림 2.6 회절격자 쌍과 양의 거리를 가진 망원경 구조	12
그림 2.7 회절격자 쌍과 음의 거리를 가진 망원경 구조	13
그림 2.8 Öffner-Type 펄스 확장기 개념도	15
그림 2.9 Öffner-Type 펄스 확장기 설계도	15
그림 2.10 각도와 거리에 따른 변수값들	16
그림 2.11 Ytterbium 이 첨가된 germanosilicate host 에 대한 흡수 및 방출 단면적	19
그림 2.12 이중 클래딩 광섬유에서의 펌프 빔의 진행	20
그림 2.13 FX-103ML 구조	22
그림 2.14 회전하는 평행한 거울	23
그림 2.15 광원 생성 파트	24
그림 2.16 펄스 확장기와 압축기 구성 파트	25

그림 2.17 펄스 증폭기 구성 파트	25
그림 2.18 레이저의 입력 펄스 폭 설계	26
그림 2.19 레이저의 bandwidth 설계	26
그림 2.20 펄스 확장기 통과 후 펄스 폭 설계	27
그림 2.21 펄스 확장기 통과 후 bandwidth 설계	27
그림 2.22 광섬유 증폭기 구조도	28
그림 2.23 광섬유 1 차 증폭기 통과 후 0.215 W 증폭 설계	29
그림 2.24 광섬유 1 차 증폭기 통과 후 bandwidth 설계	29
그림 2.25 광섬유 2 차 증폭기 통과 후 4.039 W 증폭 설계	30
그림 2.26 광섬유 2 차 증폭기 통과 후 bandwidth 설계	30
그림 2.27 펄스 압축기 통과 후 출력 2.879 W 설계	31
그림 2.28 펄스 압축기 통과 후 bandwidth 설계	31
그림 2.29 광섬유 이득매질 CPA 구성도	32
그림 3.1 Ti:sapphire 레이저	33
그림 3.2 회절격자와 그 특성	34
그림 3.3 ~90 ps 까지 측정가능한 Autocorrelator	34
그림 3.4 광섬유 융합접속 장비	35
그림 3.5 증폭 시 사용된 975 nm 펌프 LD	35
그림 3.6 Treacy-Type 펄스 확장기	36
그림 3.7 회절격자와 펄스 확장기의 광경로	36
그림 3.8 입사각 70° , 5 cm 펄스 폭 확장 설계	37

그림 3.9 Martinez-Type 펄스 확장기의 구조	38
그림 3.10 회절격자와 펄스 확장기의 광경로	39
그림 3.11 Martinez-Type 펄스 확장기의 개념도	39
그림 3.12 입사각 50° , 20 cm 펄스 폭 확장 설계	40
그림 3.13 펄스 확장기 통과 후 펄스 폭 측정	40
그림 3.14 Öffner-Type 펄스 확장기의 구조	41
그림 3.15 Öffner-Type 펄스 확장기 광경로	41
그림 3.16 수차항에 대한 설계	42
그림 3.17 s_1 에 따른 b 의 변화	42
그림 3.18 펄스 확장기 통과 후 펄스 폭	43
그림 4.1 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석 (Treacy-Type, 40°)	45
그림 4.2 확장된 펄스의 스펙트럼(Treacy-Type, 40°)	46
그림 4.3 3D image 로 보는 40° , 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭(Treacy-Type)	46
그림 4.4 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석(Treacy-Type, 50°)	48
그림 4.5 확장된 펄스의 스펙트럼(Treacy-Type, 50°)	49
그림 4.6 3D image 로 보는 50° , 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭(Treacy-Type)	49
그림 4.7 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석(Martinez-Type, 40°)	51
그림 4.8 확장된 펄스의 스펙트럼(Martinez-Type, 40°)	52
그림 4.9 3D image 로 보는 50° , 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭(Martinez-Type)	53

그림 4.10 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석(Martinez-Type, 50°)	54
그림 4.11 확장된 펄스의 스펙트럼(Martinez-Type, 45°)	54
그림 4.12 3D image 로 보는 50°, 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭(Martinez-Type)	55
그림 4.13 Ti:sapphire 레이저의 스펙트럼	56
그림 4.14 No stretcher 구조에서 광경로	56
그림 4.15 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석(Öffner-Type, 47°)	57
그림 4.16 확장된 펄스의 스펙트럼(Öffner-Type, 47°)	58
그림 4.17 3D image 로 보는 47°, 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭(Öffner-Type)	58
그림 4.18 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석(Öffner-Type, 75°)	59
그림 4.19 확장된 펄스의 스펙트럼(Öffner-Type, 75°)	60
그림 4.20 3D image 로 보는 75°, 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭(Öffner-Type)	60
그림 4.21 1030 nm 용 확장된 펄스의 출력을 보상하는 1 차 증폭기	62
그림 4.22 1 차 증폭기 구성도	62
그림 4.23 Current 에 따른 펌프 LD 의 증폭률	63
그림 4.24 Fiber Loss(YDF)	63
그림 4.25 펄스 증폭기의 증폭 특성	64
그림 4.26 펌프 LD의 Current 변화에 따른 펄스의 스펙트럼 변화 측정	64

표 차례

표 1-1 상용화된 펄스 레이저 시스템	4
표 2-1 Gaussian 및 sech^2 함수들의 경우 반치폭 관계	23
표 4-1 입사각 40° , 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표(Treacy-Type)	45
표 4-2 입사각 50° , 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표(Treacy-Type)	47
표 4-3 입사각 40° , 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표(Martinez-Type)	51
표 4-4 입사각 50° , 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표(Martinez-Type)	53
표 4-5 Concave mirror와 회절격자 간의 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화 표 (1200 groove)	57
표 4-6 Concave mirror와 회절격자 간의 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화 표 (1700 groove)	59

국 문 요 약

비열 초미세 가공용 펄스 레이저 개발을 위한 첩 펄스 증폭 시스템에 관한 연구

마이크로 산업에서 초미세 가공 기술의 수요가 증가하면서 극초단의 펄스 폭을 가지며, 작은 에너지만으로 큰 첨두 출력(Peak Power)을 낼 수 있는 펄스 레이저 시스템의 사용률이 급증하고 있다. 그리고 산업 분야가 확장되면서 초미세 가공 레이저 시스템에서 매우 큰 첨두 출력이 필요함에 따라 극초단 펄스를 증폭할 수 있는 유일한 방법인 첩 펄스 증폭(Chirped pulse amplification)기술이 펄스 레이저 시스템에 많이 응용되고 있다. CPA는 극초단 레이저 펄스의 펄스 폭을 수십 배에서 수만 배 확대함으로 매질의 손상 없이 효과적으로 증폭하여 레이저의 첨두 출력을 낮추고 그 후에 증폭함으로써 비선형현상을 피하게 되고, 다시 펄스를 압축함으로써 100 TW이상의 첨두 출력을 갖는 초고출력 극초단 펄스를 얻는 방법이다.

본 논문에서는 CPA의 첫 번째 단계인 극초단 펄스의 펄스 폭을 확장시키기 위한 방법으로 펄스 확장기(Pulse Stretcher)가 있는데, 펄스 확장기는 양의 분산효과를 보상하기 위해 음의 분산효과를 강하게 일으키는 음분산형 펄스 확장기와 음의 분산효과를 보상하기 위해 양의 분산효과를 강하게 일으키는 양분산형 펄스 확장기가 있다. 음분산형 펄스 확장기로는 Treacy-Type 펄스 확장기를 설계 및 제작하였고, 양분산형 펄스 확장기로는 Martinez-Type과 Öffner-Type으로 각각 설계 및 제작하였다. 100 fs의 펄스 폭과 1030 nm 파장 특성을 갖는 극초단 티타늄사파이어(Ti:sapphire) 펄스 레이저를 사용하여 펄스 확장기의 광원으로 사용하였다. 음분산형 펄스 확장기는 Treacy-Type 구조로 펄스 확장기를 구성하기 위해 회절격자에 입사하는 입사각을 50° 로 고정한 상태에서 회절격자 간의 거리를 10, 30, 50 cm 변화시키며, 각도에 의한 펄스 확장기의 펄스 폭 확장 정도를 설계하고 제작한 결과, 펄스의 스펙트럼 변화가 없는 펄스 폭을 확장한 데이터를 얻었다. 또한 양분산형 펄스 확장기는 Martinez-Type 구조로 펄스 확장기를 구성하기 위해 회절격자에 입사하는 입사각을 40° , 50° 로 고정한 상태에서 회절격자 간의 거리를 10, 30, 50 cm 변화시키며, 각도에 의한

펄스 확장기의 펄스 폭 확장 정도를 설계하고 제작한 결과, 펄스 폭 확장이 커짐에 따라 펄스의 스펙트럼이 잘리게 되어 이 스펙트럼 감소를 보상하기 위한 새로운 구조의 양분산형 펄스 확장기를 설계하고 제작하였다. 새로 설계하고 제작한 구조는 Öffner-Type 펄스 확장기로서 수차가 발생하지 않아 분산에 영향을 주지 않으며 스펙트럼 변화가 없고, 펄스 폭 확장 변화가 큰 펄스 확장기이다.

두 번째 단계로는 확장된 펄스를 증폭하기 위해 광매질이나 광섬유를 사용하여 증폭시키는 방법이 있는데 광섬유를 이득 매질로 사용하여 확장된 펄스를 증폭하는 광섬유 펄스 증폭기(Optical fiber pulse amplifier)를 설계하였다. 광섬유에서 일어나는 레이저의 비선형성이나 손상을 유발시키는 레이저의 첨두 강도(Peak Intensity, 단위면적당 첨두 출력)를 낮추기 위해, 이중 클래딩(Double Cladding), LMA(Large Mode Area), 이터븀(Ytterbium)이 도핑된 광섬유를 사용하여 펄스 증폭기를 설계하였다. 그리고 펄스 폭 확장 시 회절격자의 효율로 인해 감소하는 출력을 보상하는 Ytterbium이 도핑된 광섬유 1차 증폭기를 제작하여 그 특성을 살펴보았다.

그 다음 마지막 단계로는 증폭된 펄스를 압축시키기 위해 회절격자 쌍을 이용하여 펄스 압축기(Pulse Compressor)를 설계하였다. 세 단계의 설계한 데이터를 토대로 광섬유 증폭기를 이용한 CPA 시스템의 최종 출력과 펄스 폭을 살펴보았다.

핵심 되는 말: Chirped pulse amplification, Ti:sapphire, Ultra-short pulse, Pulse stretcher, Pulse compressor, Ytterbium doped fiber, Large mode area, Group delay dispersion, Diffraction grating, Diffraction angle

제 1 장 서론

펨토초(Femtosecond)레이저는 짧은 시간 폭으로 인하여 빠른 시간 안에 일어나는 현상을 연구할 수 있고, 작은 에너지만으로 큰 첨두 출력(Peak Power)을 낼 수 있어 고출력 레이저로 사용하기에 적합하다. 그리고 1985년도에 제안된 첵 펄스 증폭(Chirped pulse amplification, CPA) 방식으로 인하여,[1] 피코초 미만의 펄스를 매질의 손상 없이 효과적으로 증폭할 수 있어 100 TW이상의 첨두 출력을 갖는 초고출력 펨토초 레이저 펄스의 생성을 가능하게 하였다. 즉, CPA기술은 펨토초 레이저 기술과 결합하여 10^{15} W/cm^2 에 머물던 펄스의 세기를 10^{22} W/cm^2 까지 이루게 함으로써 펨토초 영역에서의 비선형 광학뿐만 아니라 강한 전기장에 의한 이온화 현상, 상대론적 광학 현상 등에 이르는 새로운 물리학 분야를 개척하게 해주었다.

펨토초 레이저의 시작은 1974년 Bell Lab의 Shank와 Ippen이 처음으로 색소레이저에서 펨토초 영역의 시간 폭을 갖는 펄스를 생성하게 되었다.[2] 1981년에는 100 fs 미만의 진정한 펨토초 색소레이저가 등장하였고,[3] 1985년에는 27 fs 펄스를 생성하였으며,[4] 1987년에는 레이저 외부에 스펙트럼 확대기와 펄스 압축기를 달아 6 fs의 짧은 펄스를 만들어내기에 이르렀다.[5] 하지만 색소레이저는 유지보수에 어려움이 있고 안정성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 한편, 1986년에 티타늄사파이어(Ti:sapphire)가 나오면서 펨토초 레이저의 이득 매질로 처음 사용되었고,[6] 1991년에 들어서 Spence가 티타늄사파이어 레이저의 모드 잠금에 성공하여 안정적인 60 fs 레이저펄스를 발생시킴으로써 1990년대 이후로는 색소레이저 대신에 티타늄사파이어 레이저가 대표적인 펨토초 레이저가 되었다.[7] 1990년대 중반에 들어서 고체레이저에 비해 소규모이면서도 레이저 에너지를 전달하기 쉬운 펨토초 광섬유 레이저가 나오기 시작하였다.[8] 2000년에는 어븀(Er) 및 이터븀(ytterbium)이 도핑된 광섬유 레이저를 중심으로 많은 연구가 진행 중에 있으나 아직은 광섬유 레이저에서 50 fs 미만의 짧은 펄스 폭을 만들기가 어렵고 평균출력이 낮아서 그 용도가 한정적이다.

현재까지 개발된 펨토초 고체 레이저는 고출력 특성의 상용화된 제품을 판매하고 있지만, 유지 보수가 어렵고, 환경변화에 민감하기 때문에 펨토초 레이저의 마이크로 산업 분야 적용을 위해서는 소형화, 출력 안정성, 빔모드의 우수성 및 진동/환경 둔감성 측면을 특성을 가진 펨토초 광섬유 레이저가 가장 좋을 수 있다. 즉 광섬유의 구조적 특성인 우수한 발열특성으로 인하여 고체 레이저와 마찬가지로 고반복률

및 고출력 시스템을 구현할 수 있고, 모든 광학 정렬이 광섬유 및 광섬유 기반 부품으로 대체할 수 있어서 환경 변화에 둔감하여서, 마이크로 산업용 레이저로 사용하기 위한 연구 및 제품 상용화 작업이 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 특히, 펨토초 레이저와 CPA 기술이 결합된 초고출력 레이저 펄스를 응용한 기술이 도입됨으로 인해 마이크로 산업의 확장과 더불어, 우리나라 경제 발전을 견인하는 성장동력산업인 초미세가공 기술을 통한 차세대 디스플레이, 핸드폰, 반도체, LED 및 태양전지 등의 분야에서 기술 수요가 급증하는 추세이다.

펨토초 레이저를 이용하는 초미세 가공의 장점은 그림 1.1과 같이 열 확산 길이가 나노초에 비해서 매우 짧아 가공물을 플라즈마(plasma)상태로 직접 변화시켜 가공하므로, 기존 레이저 가공에 비해 열영향영역(heat affected zone, HAZ), 열손상 및 크랙(crack) 등을 최소화 할 수 있어, 차세대 나노/마이크로 가공을 가능하게 하며 펨토초 레이저의 높은 첨두 출력에 의한 비선형 현상인 다광자 흡수(multi-photon absorption)에 의해 가공이 이루어지므로, 가공물질에 제한적이지 않으며 금속, 유전체, 세라믹 등 다양한 재료의 정밀 가공이 가능하다. 또한 이러한 비선형 다광자 흡수를 통해 모든 물질에 대한 흡수가 가능하여 다양한 물질의 3차원 정밀 가공에 이용할 수 있다.[9-11]

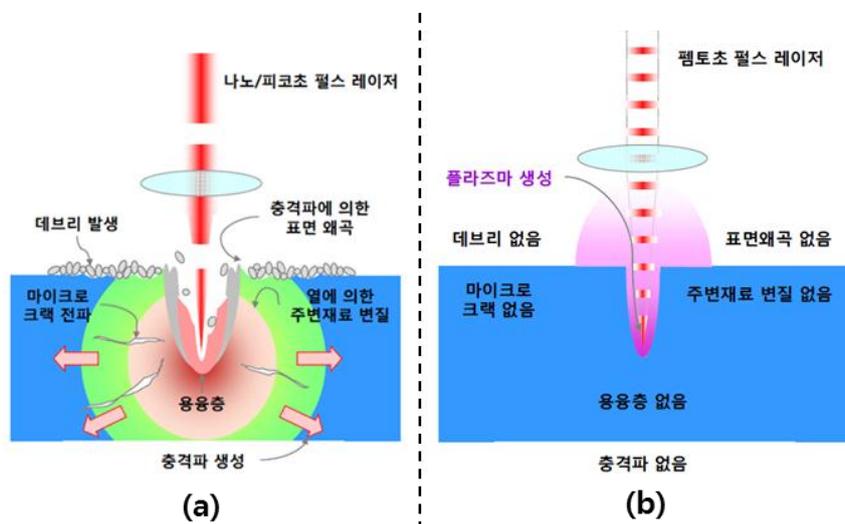


그림 1.1 (a)피코초 미만의 펄스와 펨토초 펄스를 이용한 마이크로 가공.[12]

향후 펨토초 레이저 기반 비열 초미세 가공기술은 그림 1.3과 같이 우리나라 경제

발전을 견인하는 성장동력산업의 원천/핵심 기술 개발을 통한 이익과 성장 기여를 할 수 있을 것으로 보인다.



그림 1.2 펄초 레이저 비열 초미세 녹색 가공기술 연구내용.

펄초 레이저 시스템을 개발하기에 앞서 현재 상용화되어 제품으로 판매하고 있는, 레이저의 특성을 비교해보았다. 실상, 국내에서는 펄초 레이저 시스템 판매가 전무한 상황이며, 해외에서는 파는 제품들도 상업적인 용도보다는 대부분 연구용으로 판매하고 있음을 표 1-1을 통해 확인할 수 있다. 또한, 초미세 가공용 레이저로 사용하기 위해 초고출력의 특성을 갖는 레이저는 거의 상용화가 되지 않고 있다. 그렇기에 광섬유 증폭기 기반의 CPA 시스템 연구 개발을 통하여 마이크로 산업 분야에 적용 가능한 초미세 가공 기술 레이저 시스템 연구 및 레이저 시스템 장비 제작을 할 예정이다.

Company	Specification
IMRA America	1045nm, 500fs, 100kHz, 1.0W, 10uJ, SM
Clark MXR	1030nm, 250fs, 0.2-25MHz, 20W, SM
Amplitude systems	20W, <700fs, 2MHz, 10μJ
Calmar Laser	1030-1065nm, 150fs, 10-50MHz, 400mW, bandwidth: <40nm
Fianium	1064nm, >5W, <300fs, 80MHz, bandwidth: <12nm
Toptica	980-2200nm, <100fs, 80MHz, >150mW
Del Mar Photonics	1040-1064nm, 100fs, 60-80MHz, 20mW, 0.25nJ

표 1-1. 상용화된 펄스 레이저 시스템.

본 논문에서는 CPA 기술 중 펄스 확장기와 증폭기를 설계하고 제작하였다. 티타늄사파이어 레이저를 광원으로 사용하여 펄스 레이저 펄스를 발생시켜 펄스 확장기를 통과하여 펄스를 확장하고, 증폭기를 통하여 확장된 펄스를 증폭하였다.

펄스확장기를 크게 음분산형 펄스확장기와 양분산형 펄스 확장기로 나누어 설계 및 제작하였고, 음분산형인 Treacy 구조의 펄스 확장기, 양분산형인 Martinez 와 Öffner 구조의 펄스 확장기를 설계하고 제작한 후 펄스 폭을 확장한 데이터를 분석하였다.

또한 펄스를 확장하면서 회절격자의 효율로 인해 감소되는 펄스의 출력을 1차 증폭기를 통해 보상하는 증폭기를 제작하여 그 특성을 분석하였다.

앞서 소개한 펄스 레이저 응용 기술을 가능하게 해준 초고출력의 극초단 펄스 레이저 기술을 구현하기 위해서 본 논문의 구성은 2장 도입부에 CPA 기술에 대한 원리를 먼저 소개하였고, CPA 기술 설계에 사용된 펄스 확장기, 펄스 증폭기, 펄스 압축기에 대한 이론적인 방법을 2장에 제시하였고, 3장에서는 이 이론을 가지고 3가지 구조의 펄스 확장기를 설계 및 제작하였고, Ytterbium을 사용한 1차 증폭기를 제작하였다. 또한 펄스 확장기, 광섬유 증폭기, 펄스 압축기를 구성한 CPA 시스템의 출력과 펄스 폭을 설계하여 가이드라인을 제시하였다. 4장에서는 설계 제작한 음분산형인 Treacy-Type 펄스 확장기와 양분산형인 Martinez-Type 펄스 확장기와 Öffner-Type 펄스 확장기에 대해 비교 분석하고, 광섬유 증폭기를 통과한 후 출력 결과에 대해 설명하고, 5장에서 결론 및 향후 연구 내용을 기술하였다.

제 2 장 기본 이론 및 설계

제 2.1 절 첵 펄스 증폭 시스템의 원리

CPA는 그림 2.1과 같이 펄스폭과 같은 극초단 레이저 펄스의 펄스 폭을 수십 배에서 수만 배 확대함으로 레이저의 첨두 출력을 낮추고 그 후에 증폭함으로써 비선형 현상을 피하게 되고, 펄스를 압축함으로써 높은 에너지의 극초단 펄스를 얻는 방법을 말한다. [13]

CPA의 첫 번째 단계는 극초단 펄스의 펄스 폭을 확장시키기 위해 회절격자를 사용하여 펄스 확장기(Pulse Stretcher)를 구성하는 단계로 펄스 확장기에 극초단 펄스를 통과시키면, 극초단 펄스를 구성하는 주파수 성분은 따라 시간지연을 갖도록 하여 파장이 긴 성분은 앞쪽에 파장이 짧은 성분은 뒤쪽에 오도록 하는 양분산형 펄스 확장기와 파장이 짧은 성분은 앞쪽에 파장이 긴 성분은 뒤쪽에 오도록 하는 음분산형 펄스 확장기를 통하여 극초단 펄스의 펄스 폭을 확장시킨다.

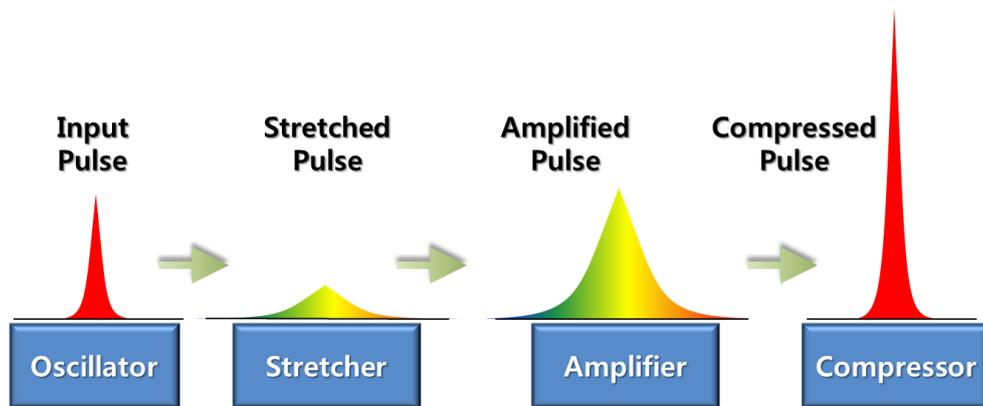


그림 2.1 첵 펄스 증폭 기술 개념도.

두 번째 단계로는 확장된 펄스를 증폭하기 위해 광매질이나 광섬유를 사용하여 증폭시키는 방법이 있다. 예를 들어 광섬유를 사용하여 증폭할 경우, 광섬유에서 일어나는 레이저의 비선형성이나 손상을 유발시키는 레이저의 첨두 강도 (Peak Intensity,

단위면적당 첨두 출력)를 낮추기 위해, 레이저 광의 공간적 크기를 늘릴 수 있는 광섬유 코어의 지름이 확대된 넓은 모드 면적의 코어(Large Mode Area, LMA)광섬유를 사용해야 한다. 그래서 LMA의 특성과 단일 모드 특성을 유지하는 희토류 금속이 도핑된 이중 클래딩 광섬유(Double Cladding Fiber, DCF)나 광결정 광섬유(Photonic Crystal Fiber, PCF)를 가지고 펄스 증폭기를 제작할 수 있다.

세 번째 단계로는 증폭된 펄스를 압축하여 원래의 극초단 펄스로 되돌아오기 위해 회절격자 쌍을 이용하여 펄스 확장기와 반대로 작용하는 펄스 압축기를 통과시켜 고출력의 증폭된 극초단 펄스를 얻는 기술이다.

위의 세 단계에 대한 내용을 쉽게 설명한 CPA 시스템의 구성도는 그림 2.2와 같다.

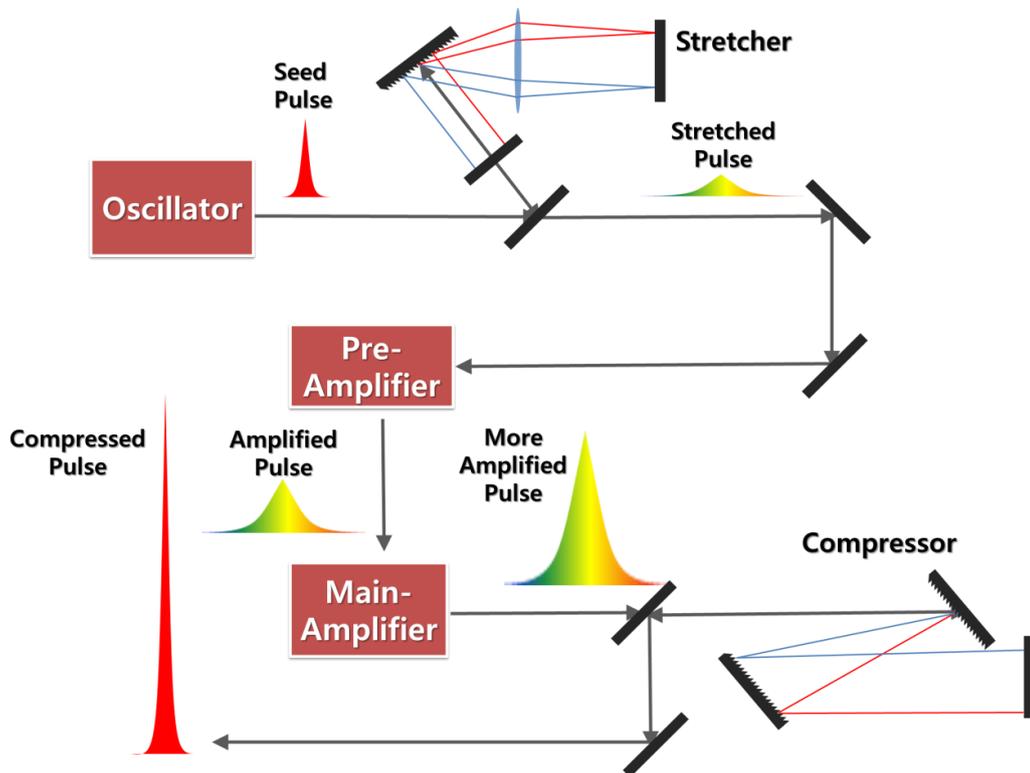


그림 2.2 펨토초 레이저를 이용한 첵 펄스 증폭 시스템 구성도.[13]

제 2.2 절 펄스 확장기의 설계 이론

극초단 펄스는 단일 파장 성분이 아닌 여러 성분의 파장을 지닌 넓은 스펙트럼 특성을 가지고 있다. 여러 성분의 파장으로 인해 물질을 지나가면서 굴절률의 차이가 발생하여 분산효과를 일으키기에 각각의 파장 별 속도차이가 발생하게 된다. 이런 효과를 보상하기 위한 방법으로 프리즘이나 회절격자로 구성하여 음의 분산효과나 양의 분산효과를 부여하는 광학계를 구성할 수 있다. 일반적으로, 양의 분산효과를 보상하기 위해 음의 분산효과를 강하게 일으키는 광학계를 음분산형 펄스 압축기라 하며, 음의 분산효과를 보상하기 위해 양의 분산 효과를 강하게 일으키는 광학계인 양분산형 펄스 확장기라 한다.

다음 장에는 펄스 확장기와 펄스 압축기의 광학적 구조를 통해 펄스 폭 확장 정도와 압축 정도를 구하기 위한 기본 이론을 바탕으로 접근하여 살펴 보겠다. 처음으로 살펴볼 내용은 파동방정식을 통해 군속도 분산(Group Velocity Dispersion, GVD)을 구하는 방법이다.

2.2.1. 군속도 분산(Group Velocity Dispersion)

파동 방정식은 다음과 같이 간단히 기술할 수 있다.[14]

$$\begin{aligned} E(t, z) &= E_0 [\cos(\omega_1 t - k_1 z) + \cos(\omega_2 t - k_2 z)] \\ &= 2E_0 \cos \left[\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t - \frac{k_1 + k_2}{2} z \right] \cos \left[\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t - \frac{k_1 - k_2}{2} z \right] \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} k_i &\equiv k(\omega_i) = \frac{n(\omega_i)\omega_i}{c} \approx k(\omega_0) + \left. \frac{dk}{d\omega} \right|_{\omega_0} (\omega_i - \omega_0) \cdots \\ k_1 &= k(\omega_0) + v_g^{-1} \omega_m, \quad k_2 = k(\omega_0) - v_g^{-1} \omega_m \\ k_0 &= \frac{k_1 + k_2}{2}, \quad v_g^{-1} \omega_m = \frac{k_1 - k_2}{2} = k_m \end{aligned}$$

$$\therefore E(t, z) = E_0 \cos[\omega_0 t - k_0 z] \cos[\omega_m t - k_m z] \quad (2-2)$$

위의 파동 방정식은 위상속도와 이동속도인 군속도 성분으로 구성되어 있음을 알 수

있다.[14]

$$\text{위상속도} = \frac{\omega_0}{k_0} = \frac{c}{n(\omega_0)} \quad (2-3)$$

$$\text{군속도} = \frac{\omega_m}{k_m} = v_g = \left[\frac{dk}{d\omega} \right]^{-1} \quad (2-4)$$

$$n_g = \frac{v_g}{c} = \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right)^{-1} \quad (\text{group index})$$

극초단 펄스는 넓은 파장 분포를 갖기 때문에, 만약 다른 주파수를 갖는 두 가지의 파장이 임의의 거리 L 을 진행해 간다고 생각해보면, 두 파장의 이동시간은 다음과 같다.[15]

$$t_1 = \frac{L}{v_{g1}}, \quad t_2 = \frac{L}{v_{g2}} \quad (2-5)$$

결국 두 신호의 시간적 차이(group delay)는

$$\begin{aligned} \Delta t_g &= t_1 - t_2 = L(v_{g1}^{-1} - v_{g2}^{-1}) \\ &= L \left(\left. \frac{dk}{d\omega} \right|_{\omega_{m1}} - \left. \frac{dk}{d\omega} \right|_{\omega_{m2}} \right) \approx L \frac{d^2k}{d\omega^2} (\omega_{m1} - \omega_{m2}) \quad (2-6) \end{aligned}$$

$$\Delta t_g = L \cdot GVD \cdot \Delta\omega = GDD \cdot \Delta\omega \quad (2-7)$$

(GDD=Group Delay Dispersion)

즉, 극초단 펄스가 확장되고 줄어드는 매커니즘을 이해하는데 결정적인 부분은 식 (2-7)이다.[15] 이 수식을 통해 펄스의 확장 정도(Δt_g)는 이동거리 (L)와 군속도 분산(GVD) 그리고 펄스의 스펙트럼($\Delta\omega$)에 따라 달라짐을 알 수 있다. 또한 설계하여 구성한 펄스 확장기나 압축기의 GDD(Group Delay Dispersion)를 안다면, 이 광학계를 통과하여 빠져 나오는 펄스 폭의 확장과 압축되는 정도를 알 수 있게 된다.[15]

2.2.2. Treacy-Type 펄스 확장기

Treacy-Type 펄스 확장기에 대한 설명을 하기 전에 펄스 폭 변화에 큰 영향을 미치는 회절 격자에 대해 먼저 설명을 하도록 하겠다. 회절 격자는 회절과 간섭을 이용하여 빛의 스펙트럼을 얻는 것으로, 평면유리나 오목 금속판에 다수의 평행선을 등간격으로 새긴 것인데, 여기에 빛이 입사되면 투과 또는 반사된 빛이 파장 별로 나누어진 스펙트럼을 얻을 수 있다. 각각의 파장마다 균일하게 퍼지기 때문에 프리즘보다 빛을 분산시키는 성능이 좋고, 여러 개의 차수인 1차 · 2차 · 3차로 병렬적으로 나타나는 등, 프리즘에 의해 일어나는 것과는 다른 특징을 볼 수 있다.

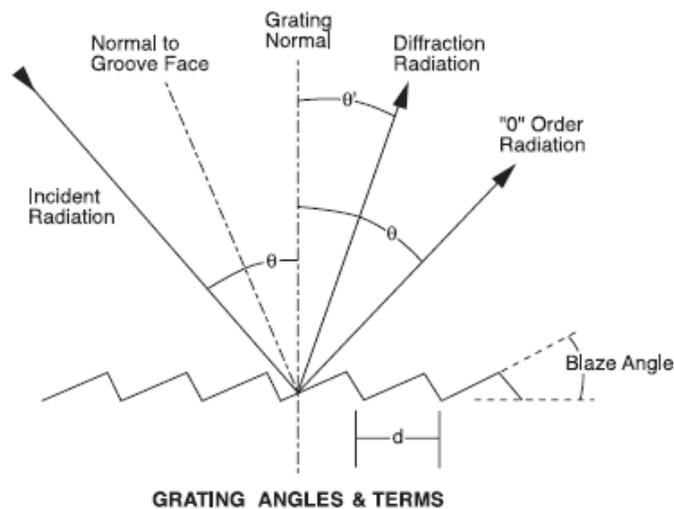


그림 2.3 반사형 회절격자. [16]

그림 2.3을 보면 알 수 있듯이, 만약에 단일 파장의 빛이 회절격자 표면에 입사되면, 반사되는 빛은 회절격자의 간격(d)와 파장 (λ)에 따라 특정방향으로 회절된다. 그래서 특정방향으로 회절되는 특성을 알기 위해 회절격자 방정식이 필요하다.

Grating Normal

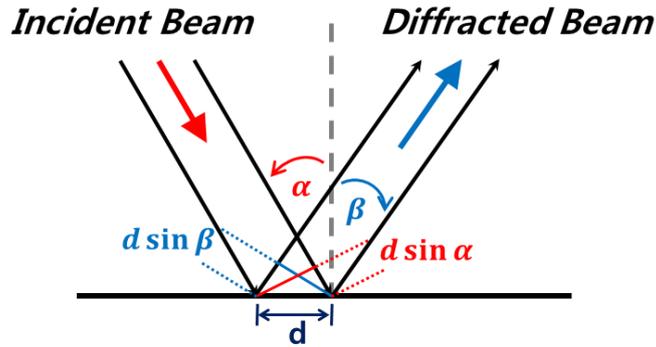


그림 2.4 반사형 회절격자의 광경로.

그림 2.4에서 알 수 있듯이, 회절격자로 입사된 빔이 회절 반사되어 나가기 위해서는 입사되고 회절되어 나가는 빔의 광경로 차이가 파장의 정수 배가 되어야 한다. 이 관계를 통하여 격자방정식을 얻을 수 있다.[17]

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (2-8)$$

(m 은 회절 차수, α 는 입사각 β 는 회절각)

또한, 만약 입사각(α)과 회절각(β)이 같으면 격자의 배치를 Littrow configuration이라고 부르며, 이 때의 조건을 만족시키는 각을 Littrow 각도라 한다.[17]

$$\sin\alpha = \frac{m\lambda}{2d} \quad (\text{Littrow angle}) \quad (2-9)$$

특별히, 회절격자는 이 Littrow각도에서 회절되는 효율이 가장 높다.

다음은 회절격자 쌍을 사용하여 구성된 펄스 확장기의 이론 설명을 하겠다.

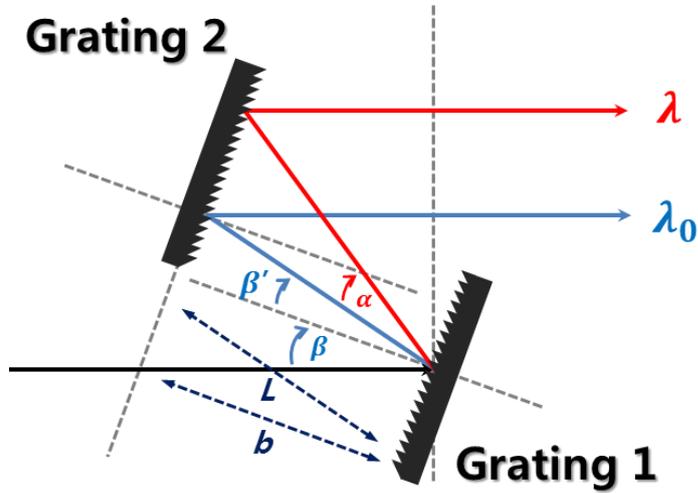


그림 2.5 회절격자 쌍을 사용한 펄스 확장기.

그림 2.5에서 β 는 입사각, $\beta' + \alpha$ 은 회절각이다. 그리고, b 는 회절격자 사이의 수직간격, L 은 회절격자 사이의 광경로 간격이다. ($L = \frac{b}{\cos\beta'}$) [15]

위의 식들을 바탕으로 회절격자의 GDD 는

$$GDD = \frac{d^2\Psi_\alpha}{d\omega^2} = -\frac{\omega L}{c} \left(\frac{d\alpha}{d\omega}\right)^2 \quad (2-10)$$

각분산은 식(2-8)의 격자 방정식으로부터 얻을 수 있다. ($m=-1$) [15]

$$\sin\beta - \sin(\beta' + \alpha) = -\frac{\lambda}{d} \quad (2-11)$$

$$-d\cos(\beta' + \alpha)\delta\alpha = -\delta\lambda \quad (2-12)$$

결국 회절격자의 GDD는

$$\frac{d\alpha}{d\omega} = -\frac{d\alpha}{dn} \frac{dn}{d\omega} \quad \left(\frac{dn}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{dn}{d\lambda}\right) \quad (2-13)$$

$$\frac{d\alpha}{d\omega} = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\alpha}{d\lambda} \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} \therefore GDD &= \frac{d^2\psi_\alpha}{d\omega^2} = -\frac{\omega L}{c} \left(\frac{d\alpha}{d\omega}\right)^2 \\ &\approx -\frac{L\lambda_0^3}{2\pi c^2 d^2 \cos^2\beta'} = -\frac{b\lambda_0^3}{2\pi c^2 d^2 \cos^3\beta'} \end{aligned} \quad (2-15)$$

이다. 식(2-15)을 통해 GDD의 값은 틀림없는 음의 값을 나타낼 수 있다. [15] 회절격자의 간격(b)을 변화시키면, GDD의 크기를 조절할 수 있다. [15,18-21] 그리고, Treacy 구조의 펄스 확장기는 음분산형으로서 만약 펄스 확장기의 GDD 값이 양의 값일 때, 펄스를 압축하기 위해 GDD의 값이 음의 값을 가진 펄스 압축기의 이론과 같다.

2.2.3. Martinez-Type 펄스 확장기

이번에는 양분산형 펄스 확장기 중 Martienz-Type 펄스 확장기에 대하여 알아보겠다. 회절격자 쌍을 이용한 Matinez 구조의 펄스 확장기는 앞서 논의한 Treacy-Type 펄스 확장기에서 식(2-15)에 양의 값을 부여하는 방법인데, 이는 음의 값을 갖는 거리(b)로 광학구조를 설계하는 것이다. 음의 거리를 갖는 광학 구조는 회절격자 사이에 볼록렌즈 두 개를 이용한 망원경 구조를 삽입함으로써 얻어질 수 있다. 이것은 Martinez 가 시도한 방법으로 Matinez-Type 펄스 확장기라 부른다. [22,23] 먼저 두 회절 격자 사이에 망원경 구조가 삽입된 그림은 그림 2.6과 같다.

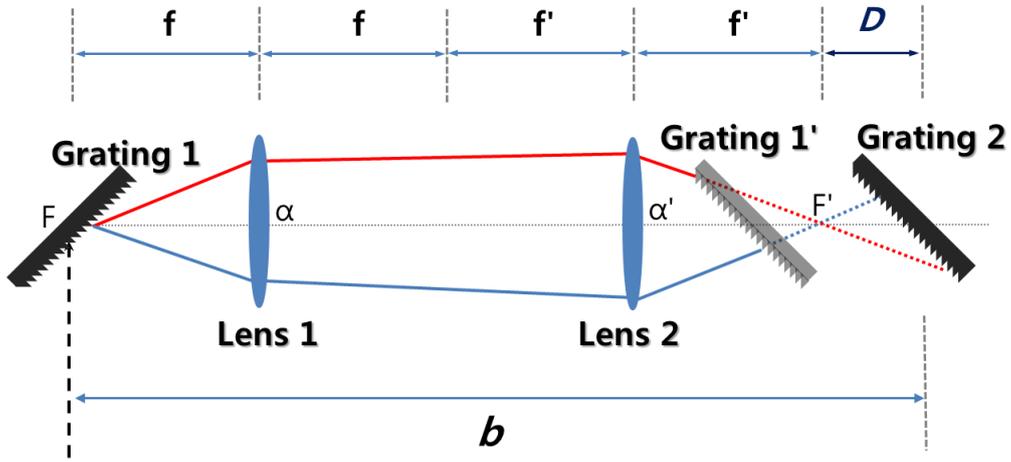


그림 2.6 회절격자 쌍과 양의 거리를 가진 망원경 구조.

망원경 효과는 다음의 내용을 통해 이해될 수 있다. 망원경 구조를 통과한 빔은 그림에서 보듯이 새로운 Grating 1'과 Grating 2사이의 경로를 진행하는 구조로 생각할 수 있다. 렌즈의 수차가 무시될 수 있다면, F와 F'사이의 광경로는 각 α, α' 에 독립이다. 그러므로 분산에 영향을 주는 길이는 다음과 같다. [15]

$$D = b - \overline{FF'} = b - 2(f + f') \quad (2 - 16)$$

그리고, 망원경 효과로 각의 분산효과는 망원경의 배율($M = \frac{f}{f'}$)만큼 증가하게 된다.

$$\begin{aligned} GDD &= \frac{d^2 \Psi_\alpha}{d\omega^2} = -\frac{\omega L}{c} \left(\frac{d\alpha}{d\omega} \right)^2 \\ &= -\frac{\omega}{c} \left(\frac{d\alpha}{d\omega} \right)^2 DM^2 \end{aligned} \quad (2 - 17)$$

이다. 여기서 그림 2.6처럼 거리를 양의 값을 주면 음의 효과를 극대화시킨 음분산형 펄스 확장기가 된다.[15] 그런데 만약 회절격자가 렌즈의 초점거리 안쪽으로 들어간다면, 그림 2.7에서 알 수 있듯이 분산의 영향을 주는 거리는 음의 값을 갖게 된다.

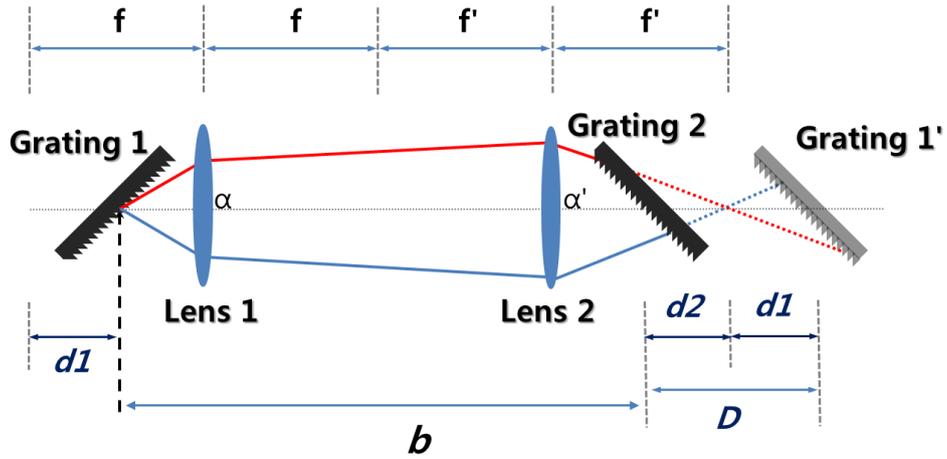


그림 2.7 회절격자 쌍과 음의 거리를 가진 망원경 구조.

식(2-16)에 의해 $D = b - 2(f + f')$ 이므로 분산에 관여하는 길이는 $D = -(d1 + d2)$ 으로써 음의 값을 지니게 된다. 이 때의 GDD는

$$\begin{aligned}
 GDD &= \frac{d^2 \Psi_\alpha}{d\omega^2} = -\frac{\omega L}{c} \left(\frac{d\alpha}{d\omega} \right)^2 \\
 &= \frac{\omega}{c} \left(\frac{d\alpha}{d\omega} \right)^2 (d1 + d2) M^2
 \end{aligned} \tag{2-18}$$

즉, 양의 분산효과를 얻을 수 있다.[15]

그러므로, 식(2-16)와 식(2-18)을 통하여 GDD의 값은 양의 값을 갖는다.[15]

$$GDD = \frac{(d1 + d2) M^2 \lambda_0^3}{2\pi c^2 d^2 \cos^2 \beta'} \tag{2-19}$$

결국, 이 펄스 확장기를 통하여 얻을 수 있는 펄스 확장 효과는 망원경 구조의 배율 (M)이 1인 경우, 식(2-7)와 식(2-19)를 통하여

$$\Delta t_g = \frac{(d1 + d2) \lambda_0^3}{2\pi c^2 d^2 \cos^2 \beta'} \cdot \Delta \omega \tag{2-20}$$

임을 알 수 있다. 바로, 회절격자 간의 간격의 거리에 음의 거리를 준 것이 Martinez

-Type 펄스 확장기이다. [15, 19, 24, 25]

2.2.4. Öffner-Type 펄스 확장기

앞서 설명했던 Martinez 구조와 같은 양분산형 펄스 확장기로서 Martinez 구조보다 펄스 폭을 같은 크기에서 훨씬 더 확장할 수 있으며, 렌즈 대신에 거울을 사용하기 때문에 발생하는 수차를 최소화시키고, 대구경 반사경을 사용하여, 회절되는 빔의 크기를 다 포함하는 펄스 확장기의 구조로 그림 2.8과 같은 Öffner-Type 펄스 확장기이다. [26]

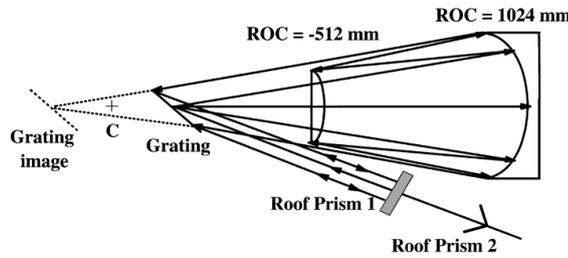


그림 2.8 Öffner-Type 펄스 확장기 개념도. [27]

이 구조는 회절격자와 구면거울 사이의 거리와 회절되는 각도에 의해 펄스 폭 확장 정도에 영향을 끼친다. 펄스 폭 확장 정도를 구하기 위해 Ray tracing model 을 방법을 이용하여 그림 2.9의 구조를 토대로 설계를 하였다.

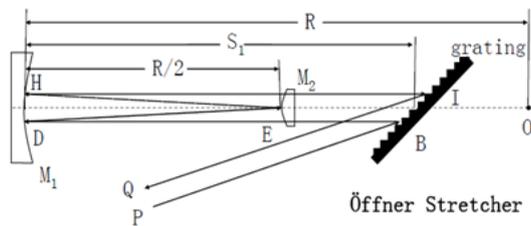


그림 2.9 Öffner-Type 펄스 확장기 설계도. [27]

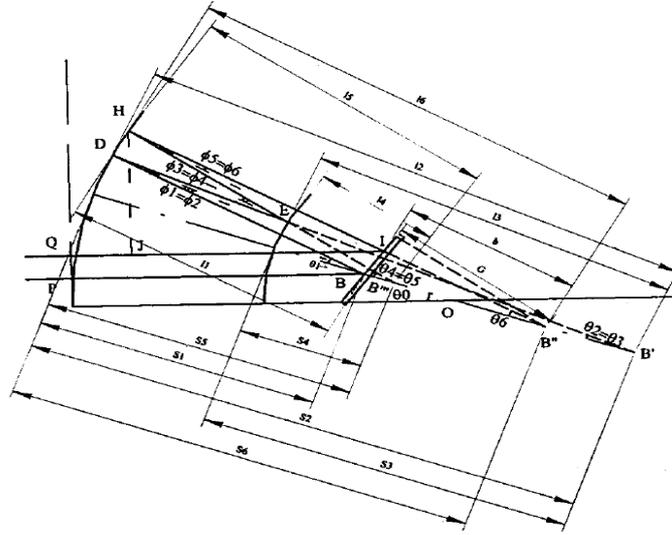


그림 2.10 각도와 거리에 따른 변수값들. [28]

구면거울과 회절격자와 볼록거울로 설계된 펄스 확장기는 구면거울과 볼록거울에 의해 허상의 회절격자를 갖는다. 펄스 확장기의 구면거울 반경은 R , 입사각은 γ , 구면거울 중앙에 대한 각은 θ_0 , 중앙에서 벗어난 각도는 θ_1 로 정의한다. 먼저 펄스 확장기를 한번 통과할 때의 총 광경로를 알아보자. 총 광경로는 그림 2.10을 통해 알 수 있듯이

$$P_{total} = P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad \text{이다.} \quad (2-21)$$

각각의 경로는 다음으로 정의된다.

$$P_0 = PB = l_0 = R \left[1 - \left(1 - \frac{s_1}{R} \right) \cos \theta_0 \right] \quad (2-22)$$

$$P_1 = BD = l_1 = R \frac{\sin(\theta_1 - \phi_1)}{\sin \theta_1} \quad (2-23)$$

$$P_2 = DE = l_2 - l_3 = R \frac{\sin(\theta_1 - \phi_1)}{\sin \theta_2} - \frac{R \sin(\theta_3 + \phi_3)}{2 \sin \theta_3} \quad (2-24)$$

$$P_3 = EH = l_5 - l_4 = R \frac{\sin(\theta_5 - \phi_5)}{\sin \theta_5} - \frac{R \sin(\theta_3 + \phi_3)}{2 \sin \theta_4} \quad (2-25)$$

$$P_4 = HI = l_6 - b = R \frac{\sin(\theta_5 - \phi_5)}{\sin\theta_6} - (s_6 - s_1) \frac{\cos(\gamma - \theta_0)}{\cos(\gamma - \theta_0 - \theta_6)} \quad (2-26)$$

$$P_5 = IQ = IJ + JQ$$

$$= (l_6 - b) \cos(\theta_0 + \theta_6) + [R - l_6 \cos(\theta_0 + \theta_6) + (s_6 - b) \cos\theta_0] \quad (2-27)$$

총 광경로는 세 가지의 성분으로 구분할 수 있는데, 상수항과 각에 따른 수차항과 회절격자와 구면거울의 간격에 따른 분산항으로 구분할 수 있다. 이 때 상수항을 C, 수차항을 A, 분산항을 D로 정의하면

$$C = 2R - (R - s_1) \cos\theta_0 \quad (2-28)$$

$$A = R[\sin(\theta_1 - \phi_1) \left(\frac{1}{\sin\theta_1} + \frac{1}{\sin\theta_2} \right) - \frac{1}{2} \sin(\theta_3 + \phi_3) \left(\frac{1}{\sin\theta_3} + \frac{1}{\sin\theta_4} \right) + \sin(\theta_5 - \phi_5) \left(\frac{1}{\sin\theta_5} + \frac{1}{\sin\theta_6} \right) + R \frac{\sin\phi_6}{\sin\theta_6} \cos\theta_0] \quad (2-29)$$

$$D = (s_6 - s_1) \frac{\cos(\gamma - \theta_0)}{\cos(\gamma - \theta_0 - \theta_6)} [1 + \cos(\theta_0 + \theta_6)] = b[1 + \cos(\theta_0 + \theta_6)] \quad (2-30)$$

이다. [28]

식(2-30)에서 D의 값 중 펄스 폭 확장에 영향을 미치는 거리 b를 통하여 식(2-20)의 거리 값 대신 사용하면 펄스 폭 확장 정도를 알 수 있다.

제 2.3 절 광섬유 증폭기의 특성

Ti:Sapphire 기반의 펄스 레이저는 높은 첨두 출력을 가지고 있어, 펄스 당 에너지가 크고, 피코초 미만의 펄스 폭을 생성할 수 있는 우수한 광원이다. 하지만 평균 출력의 확장(scalability)이 어렵고, 직접적인 다이오드 레이저 펌핑이 불가능하여 변환효율이 상당히 낮으며, 시스템이 복잡하고 커서 광정렬, 출력 안정성 및 유지 보수 등의 단점을 가지고 있다. 최근 이득 매질에서 발생하는 열에 의한 한계를 극복하기 위해, 얇은 디스크(thin disk)나 슬랩(slab) 형태의 이득 매질의 형태도 제안되었지만, 효율이 낮아 추가 증폭을 요구하기에 시스템이 추가로 복잡해지고 커지는 단점이 있다. 이에 반해서 광섬유 기반의 고출력 이득매질은 큰 표면적 대 부피 비로 인해 열 발산에 있어서 큰 장점을 가지며, 광원과 펌프 광원 간의 상호 작용이 레일레이(Rayleigh)길이에 국한되지 않고, 광섬유의 길이로 조절이 가능하므로 단일투과(single pass)만으로 높은 증폭률을 얻을 수 있다. 이와 더불어 간단한 광학계 구성으로 인해 출력이 안정적이고, 진동 등의 환경변화에 강점을 가지고 있다. 특히 이터븀(Yb) 첨가 광섬유의 경우, 발진파장인 1030 ~ 1070 nm 대역이 펌프 다이오드의 파장인 980 nm 와 가깝기 때문에 광변환 효율이 최대 80 % 를 넘으므로, 이로 인해 낮은 열 발산 특성 또한 동시에 갖는다. 본 논문에서는 970 nm 파장인 펌프 광원을 사용하여 1030 nm 파장 대역에서 광변환 효율이 높은 Ytterbium 첨가 광섬유를 사용하여 광섬유 증폭기를 설계하였다.

2.3.1. 광섬유에 첨가된 Ytterbium 이온

고출력 광섬유 레이저용 이득 매질(gain medium)은 희토류 금속이 첨가된 광섬유로서 희토류 중에서 네오디뮴(neodymium)과 Ytterbium이 적합하다. 네오디뮴은 좋은 흡수율을 얻기 위해 파장이 808 nm 인 광원을 사용하고, 반면에 Ytterbium은 파장이 976 nm 인 광원을 사용할 수 있다. 이 물질들은 다른 에너지 밴드갭을 가지고 있어서 1060, 1030 nm 주변에서 빛이 방출된다. 네오디뮴이 첨가된 경우 에너지 준위가 4준위 시스템으로 1060 nm 영역에서 레이저가 동작하고, 레이저 동작 임계값이 상대적으로

로 낮다. Ytterbium이 첨가된 경우는 1030 nm 영역에서 레이저가 동작하고 에너지 준위가 3준위 내지 유사 4준위 형태를 보이기 때문에 레이저 동작 임계값은 낮으나 에너지 변환효율이 높다. 즉, 이득매질로서 사용했을 때 네오디움의 광 변환효율보다 Ytterbium의 광 변환 효율이 높다. 또한 Ytterbium의 에너지 레벨 구조와 재흡수 효과는 상대적으로 높은 문턱 펌프 파워를 만든다. Ytterbium이 첨가된 광섬유는 넓은 형광폭과 낮은 양자결함을 보유하고 있어 극초단 펄스 광섬유 레이저, 또는 고출력 극초단 펄스 광섬유 레이저에 사용한다.[29]

그림 2.11에서와 같이 Ytterbium이 첨가된 광섬유는 상대적으로 975 nm 에서 좁은 흡수 밴드폭을 갖고, 1 μm 영역에서 넓은 방출 밴드폭을 갖는다.

Yb^{3+} 이온의 넓은 흡수 스펙트럼으로 인하여 펌프 광원을 구성하기 쉽다. 그림 2.11에서 펌프 광원으로 사용되는 흡수 스펙트럼은 800 nm 에서 1060 nm 까지 넓게 뻗어 있다. 이 범위 내에서 펌프광의 파장을 선택함으로써 레이저 구성에 사용할 수 있다. 그림 2.11와 같이 Ytterbium 광섬유의 파장이 1000 nm 부근에서 흡수는 상대적으로 약하지만, 파장이 1030 nm 나 1060 nm 를 이용한 펌프 수단으로 중요한 역할을 하고 있다. 일반적으로 측정 파장의 레이저동작이 요구되는 경우 이러한 넓은 흡수 스펙트럼은 Ytterbium 첨가 광섬유 레이저의 펌프 광원의 파장 다양성을 나타내고 있기에 유리하다. 그러나 이러한 펌프 광원의 다양성보다 먼저 고려할 점은 첫째는 펌프광보다 긴 파장의 레이저 동작이 가능하다는 점이고, 둘째는 975 nm 에서의 펌핑은 가장 큰 흡수 단면적을 가지며, 따라서 단일 주파수 레이저와 같이 가장 짧은 광섬유 길이를 요구하는 경우에 특별히 적합하다는 점이다.

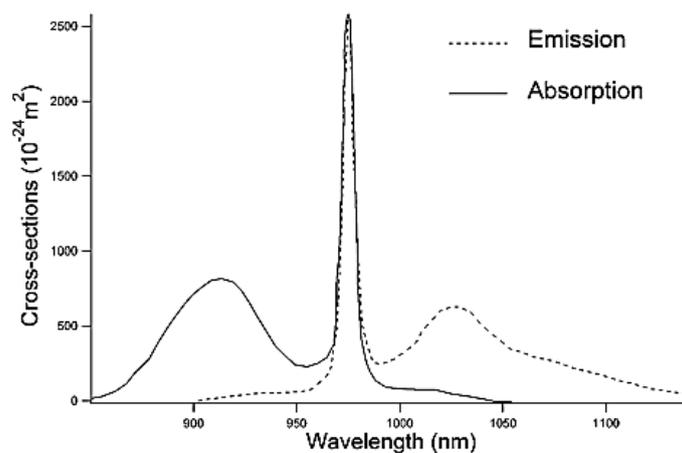


그림 2.11 Ytterbium이 첨가된 germanosilicate host에 대한 흡수 및 방출 단면적.[30]

2.3.2. 펄스 증폭기용 광섬유

일반적으로 광통신 시스템에서 사용하는 광섬유는 작은 단일모드 코어를 갖고 있으며 출력은 수 W 미만 정도이다. 더 강한 출력을 내기 위해 나온 방법이 이중 클래딩 광섬유 (double cladding fiber, DCF)이다. DCF는 코어 직경이 수 μm ~ 수십 μm 이며, 희토류 원소가 첨가되어 있고 그 주위로 아주 큰 직경을 갖는 내부 클래딩과 외부 클래딩으로 구성되어 있다. 대개 내부 클래딩의 직경은 수백 μm 정도이다. 그림 2.12를 보면 클래딩의 굴절률은 중심 코어의 굴절률보다 낮다. 그 밖에도 DCF는 그림 2.12의 구조와 달리 여러 가지 방법으로 구현할 수 있다.[31]

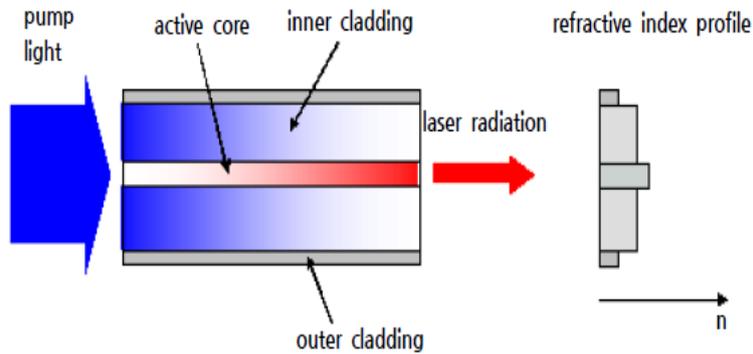


그림 2.12 이중 클래딩 광섬유에서의 펌프 빔의 진행.[32]

DCF는 높은 출력을 얻기 위해 내부 클래딩(inner cladding)에 광펌핑을 해준다. 내부 클래딩 옆 면에 광 펌핑(side pumping)을 해주어 내부 클래딩에 펌프 빔을 진행하도록 한다. 내부 클래딩이 외부 클래딩보다 굴절률이 높아서, 광원은 전반사에 의해 내부 클래딩 내에서 전파되고, 펌프 빔이 내부 클래딩을 지나가면서 코어에 존재하는 희토류 원소들과 상호작용하여 광원을 흡수하게 된다. 즉, 펌프 광이 광섬유에 있는 희토류 이온들을 높은 에너지 레벨로 여기시키고, 광원이 여기된 곳을 지나가면서 유도 방출하여 증폭된 빔이 출력된다. 그리고 증폭된 광원과 함께 펌프 빔이 섞여 나오게 된다.

고출력 광섬유 레이저를 구현하기 위해 해결해야 할 요소는 광섬유에서 발생하는

열이다. Ytterbium이 첨가된 광섬유 레이저는 좋은 열적 특성을 갖고 있어서 펌프 에너지가 열로 바뀌는 비율이 15% 미만이고, 또한 광섬유 레이저는 고체 레이저에 비해 상대적으로 긴 길이를 사용하기 때문에 여기 과정에서 발생하는 열을 긴 길이에 걸쳐서 분산시킬 수 있는 장점이 있다.[31] 게다가, 더 높은 출력을 얻기 위해서 개발된 광섬유는 LMA를 갖는 광섬유이다. 그렇지만, LMA광섬유는 코어 사이즈가 크기 때문에 좋은 빔을 갖는 단일 모드 출력을 얻는 것은 쉽지가 않다. 이 문제를 위해서 개발된 광섬유가 코일로 이루어진 광섬유(coiled fiber)이다. 이러한 광섬유는 LMA를 사용한 광섬유 레이저에서 단일모드로 발진하기 위해 사용되었다.[33] 본 논문에서는 DCF에 1030 nm 파장대역에서 고출력 증폭 시스템을 구성하기 위해, Ytterbium이 도핑되어 있으며, LMA를 가진 광섬유를 가지고 증폭기를 제작하였다.

제 2.4 절 펄스 폭 측정 방법

레이저의 극초단 펄스 폭을 측정하는데 있어서 기존의 전자적인 방법에 한계가 있기 때문에 상관(correlation)을 측정함으로 간접적인 방법을 이용하여 펄스 폭을 측정한다. 여기에는 광학적 Kerr 효과를 측정하는 방법, 이광자 형광(Two Photon Fluorescence, TPF)을 이용하는 방법, 그리고 2차 고조파 발생(Second Harmonic Generation, SHG)을 이용하는 방법이 있다.

본 연구에서 펄스 폭을 측정하기 위해 사용된 자기상관기(autocorrelator)는 FR-103XL 모델로 그림 2.13와 같고, 이것은 Michelson 간섭계에서 처음으로 사용된 2차 고조파 발생의 방법을 이용해서 펄스 폭을 측정하는 것이다. 기본적인 구성인 비중선(noncollinear) 빔이 무배경 자기상관계 측정을 유도한다.[34] 그림 2.14에서와 같이 회전축의 중심에 대해 서로 평행한 두 거울을 통해 반복적으로 통과하는 빛의 경로를 증가 또는 감소시켜서 선형지연을 발생시킨다.

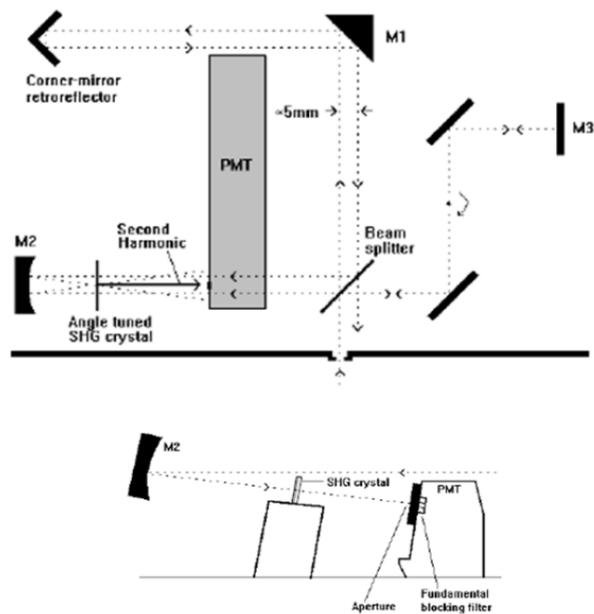


그림 2.13 FX-103ML 구조.[35]

FR-103XL에서는 자기상관함수를 측정함으로 자기상관함수의 반치폭인 자기상관폭으로부터 레이저의 실제 펄스 폭을 얻을 수 있다. 표 2-1은 Gaussian 및 sech^2 함수들의 경우 반치폭 관계를 나타내고 있다.

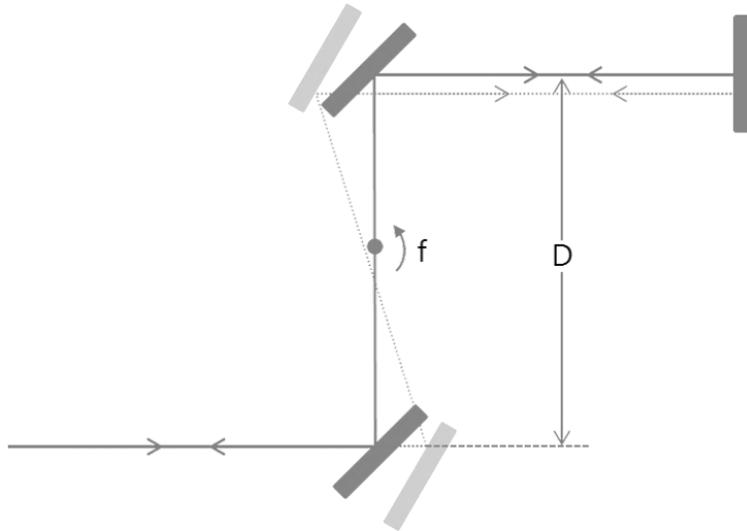


그림 2.14 회전하는 평행한 거울.

$I(t)$	τ_0/t_0
$\exp\left\{-\frac{(4 \ln 2)t^2}{\tau_0^2}\right\}$	0.7071
$\text{sech}^2\left\{\frac{1.76t}{\tau_0}\right\}$	0.6482

표 2-1. Gaussian 및 sech^2 함수들의 경우 반치폭 관계.

제 2.5 절 CPA 시스템 설계

2.5.1. Fiber Desk Program

CPA 시스템을 제작하기 전에 앞서 CPA 시스템을 통해 레이저 증폭률을 정하기 위해 펄스 폭 확장 정도와 여러 단계의 증폭기 구성, 펄스 압축 정도를 설계할 필요가 있다. 이 설계를 위해 Fiber desk 라는 프로그램을 사용하여 전체 CPA 시스템을 설계하였다. Fiber desk는 광원을 원하는 파장대역, 펄스 폭, 빔의 형태, 출력 등을 조절하여 그림 2.15와 같이 생성할 수 있다.

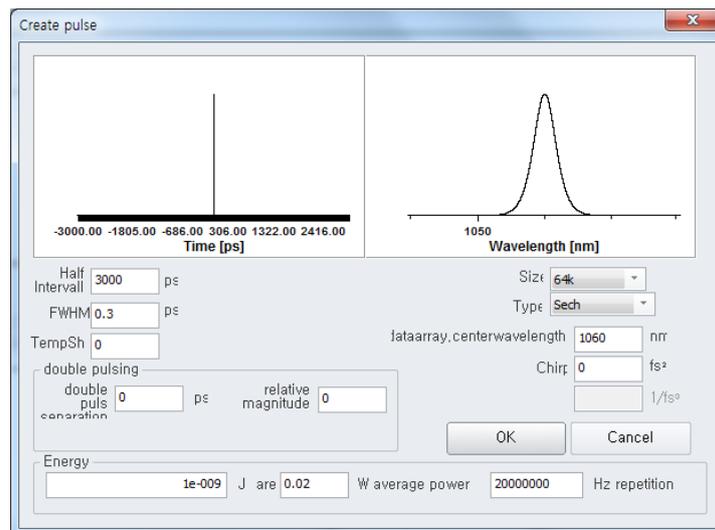


그림 2.15 광원 생성 파트.

또한 입사각과 파장, 회절격자 수 입력이 가능하여 2장에서 설명한 GVD에 대한 값을 구할 수 있고, 회절격자 간의 거리를 입력할 수 있어, 펄스 폭 확장 정도를 정할 수 있다.

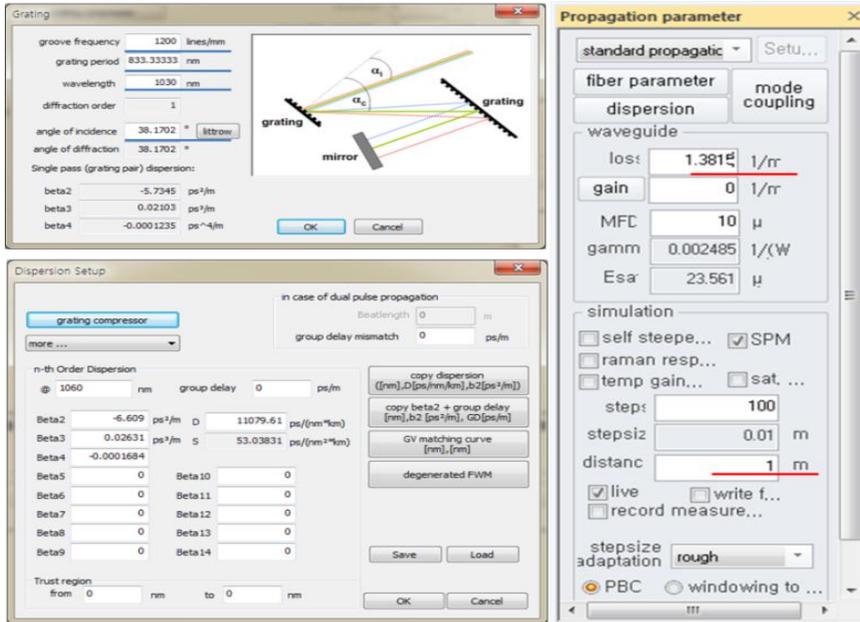


그림 2.16 펄스 확장기와 압축기 구성 파트.

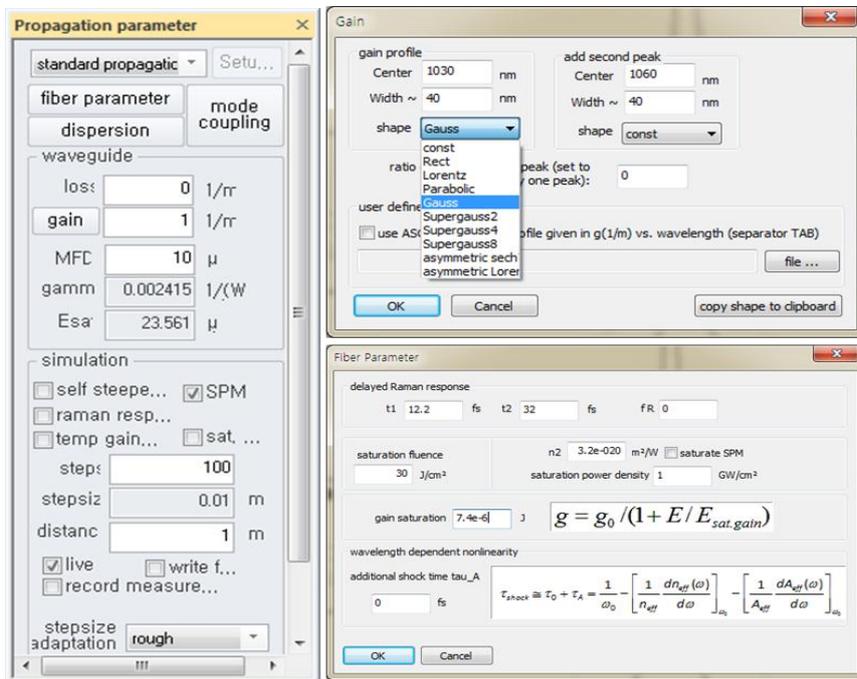


그림 2.17 펄스 증폭기 구성 파트.

마지막으로 광섬유의 특성인 MFD(mode field diameter), fiber 길이가 입력가능하고, 광섬유의 최대 출력 효율(Gain)을 입력하면 광섬유를 이용한 펄스 증폭기를 구성할 수 있다. 또한 펄스 확장기, 증폭기, 압축기를 연속적으로 시뮬레이션하여 CPA 시스템의 최종 출력과 펄스 폭을 알 수 있다. Fiber desk를 통해 CPA 시스템을 설계할 수 있지만, 세부적으로 펄스 확장기의 구조나 펄스 압축기의 구조가 달라지게 되면, 직접 광경로를 계산하여 거리를 구해야하고, 펄스 증폭기 설계 시, 사용하는 광섬유의 특징이나 포화한계, Gain의 비율을 직접 계산해야 하는 어려움이 있다.

2.5.2. 펄스 확장기 설계

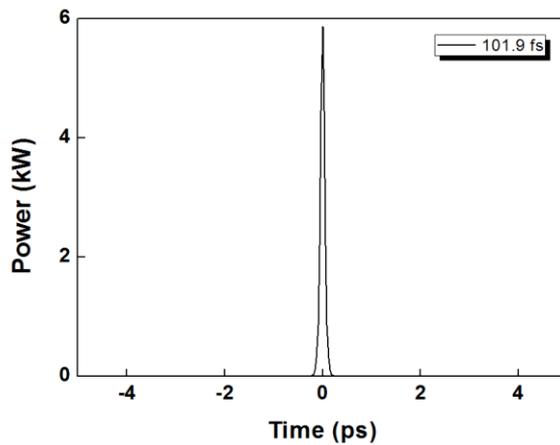


그림 2.18 레이저의 입력 펄스 폭 설계.

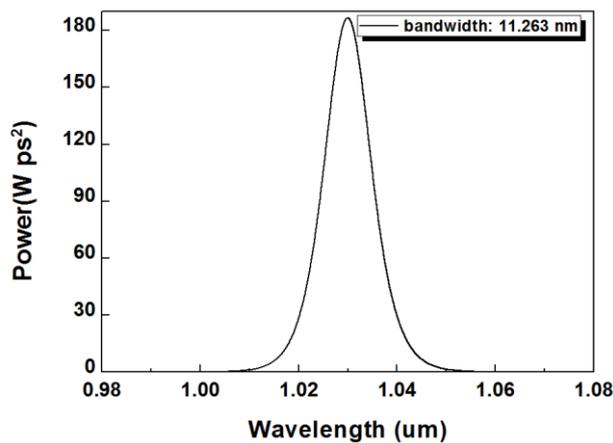


그림 2.19 레이저의 bandwidth 설계.

그림 2.18-19는 티타늄사파이어 레이저의 입력 펄스와 bandwidth로써, 펄스 폭이 100 fs, 반복률이 75 MHz, 평균출력이 50 mW 이고, 펄스 확장기의 설계에 사용하기 위해 특별히 설계한 레이저 광원 설계 펄스이다. 또한 펄스 확장기에서 광학계 정렬이나 회절격자의 효율성을 고려하여 발생하는 손실(3dB)을 포함하여 설계한 결과, 펄스 폭이 73.899 ps, bandwidth가 11.263 nm 였다. 그림 2.7과 식(2-20)을 통해서 거리 값을 35 cm 라는 음의 거리로 설정한 Martinez-Type 펄스 확장기이다. 설계를 통한 확장된 펄스 폭은 그림 2.20과 같다.

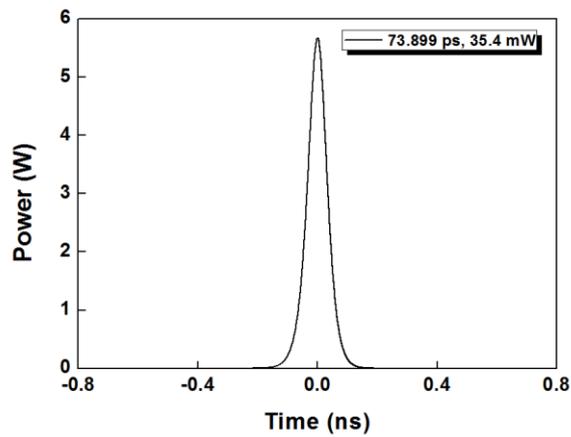


그림 2.20 펄스 확장기 통과 후 펄스 폭 설계.

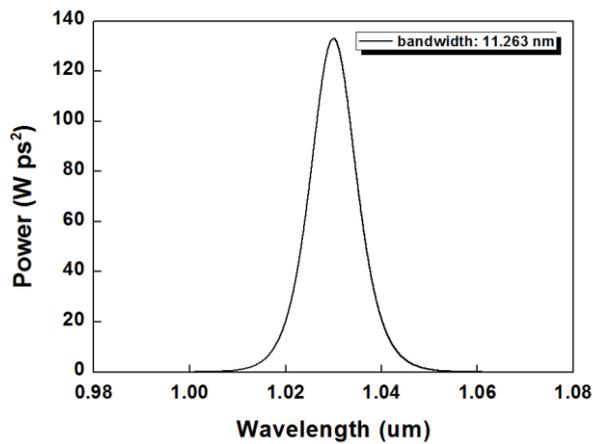


그림 2.21 펄스 확장기 통과 후 bandwidth 설계.

펄스 확장기를 통과하면서 평균 출력이 35.4 mW 정도 낮아짐을 알 수 있었고, 그림 2.19와 그림 2.21를 비교해보면 bandwidth는 변화하지 않음을 확인하였다.

2.5.3. 광섬유 증폭기 설계

광결정기반 증폭기가 가지고 있는 시스템의 복잡함 및 큰 사이즈, 광정렬 및 출력 안정성 등의 단점에 비해 광섬유 증폭기는 열 발산에 있어서 큰 장점을 가지고 있고, 간단한 광학계 구성으로 인한 안정적인 고출력을 낼 수 있다. 광 증폭기 설계 시 더 강한 출력을 내기 위해 Ytterbium이 첨가된 이중 클래딩 광섬유로 구성된 증폭기 설계를 하였다. 그러나 증폭기 한 개만으로 본 논문에서 원하는 출력을 얻을 수 없었다. 그래서 Ytterbium이 첨가된 단일모드 광섬유로 구성된 증폭기를 그림 2.22와 같이 설계하여 원하는 출력을 내도록 하였다.

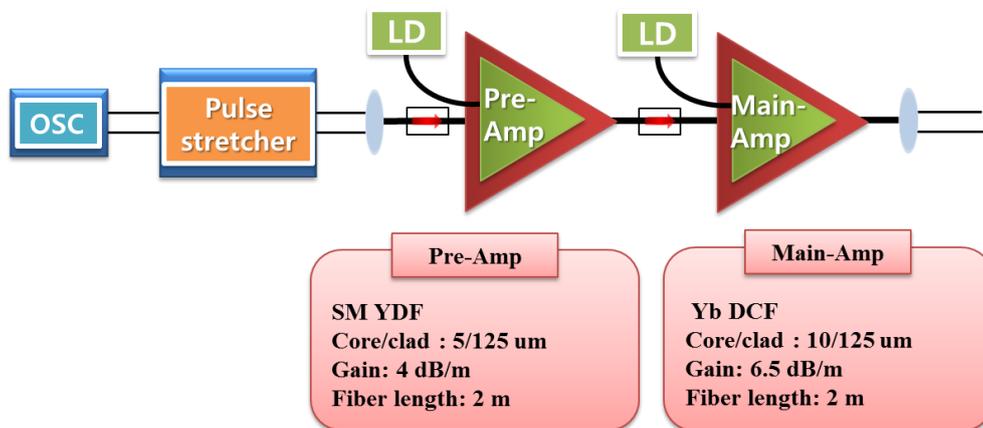


그림 2.22 광섬유 증폭기 구조도.

광섬유 증폭기 설계 시 광섬유의 특성상 발생하는 음의 분산효과와 고출력이 들어올 때 생기는 비선형현상인 SPM(Self-phase-modulation)을 고려하여 증폭기를 설계하였다. 증폭기 1 개일 경우에는 MFD(mode field diameter)가 4.4 μm 이고, gain이 4

dB/m 이며, Ytterbium이 첨가된 단일모드의 광섬유의 길이가 2m 인 증폭기를 설계하였다. 펄스 확장기를 거쳐 증폭된 결과는 그림 2.23-24와 같이 펄스 폭이 71.857 ps, bandwidth가 10.963 nm 이고 평균 출력이 0.215 W 였다. 광섬유의 손실을 0 dB 로 계산하여 확장된 펄스의 음의 분산효과와 SPM 효과로 인해 그림 2.21과 2.24를 비교하면 펄스 폭과 bandwidth가 변화되었음을 알 수 있었다.

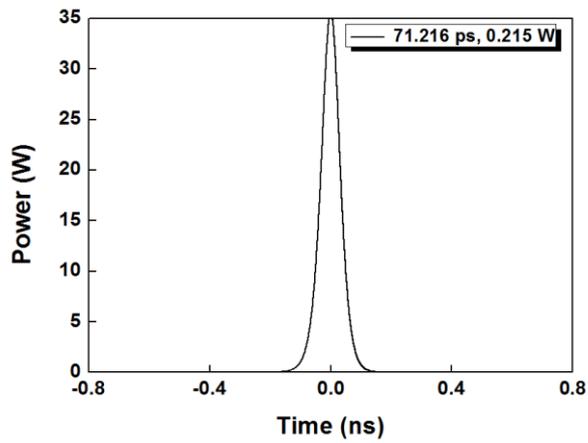


그림 2.23 광섬유 1차 증폭기 통과 후 0.215 W 증폭 설계.

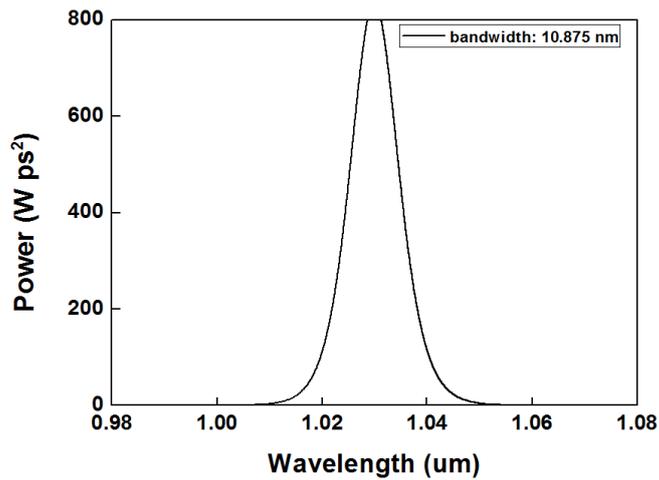


그림 2.24 광섬유 1차 증폭기 통과 후 bandwidth 설계.

증폭기 2 같은 경우에는 MFD(mode field diameter)가 10 μm 이고, gain이 6.5 dB/m 이며, Ytterbium이 첨가된 단일모드의 광섬유의 길이가 2m 인 증폭기를 설계한 결과 그림 2.25-26과 같이 펄스 폭이 67.441 ps, bandwidth가 10.348 nm 이고 평균 출력이 4.039 W 였다. 광섬유의 손실을 0 dB 로 계산하여 확장된 펄스의 음의 분산효과와 SPM 효과로 인해 그림 2.24와 2.26을 비교하면 펄스 폭과 bandwidth가 더 변화되었음을 알 수 있었다. 이 bandwidth의 변화로 인해 펄스 압축 시 원래의 광원 펄스 폭만큼 압축 시킬 수 없다. 그리하여 증폭기 설계 시 SPM 효과를 고려하여 bandwidth의 변화를 줄여야 한다.

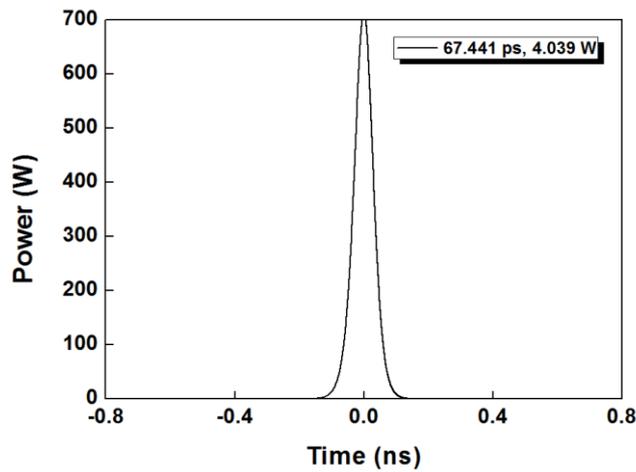


그림 2.25 광섬유 2차 증폭기 통과 후 4.039 W 증폭 설계.

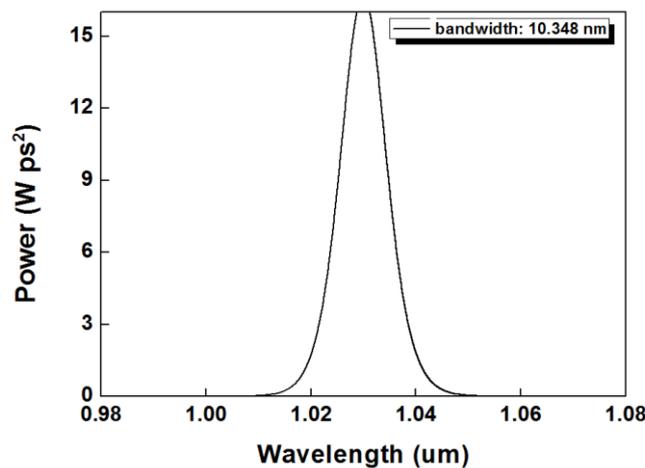


그림 2.26 광섬유 2차 증폭기 통과 후 bandwidth 설계.

2.5.4. 펄스 압축기 설계

펄스 압축기는 그림 2.5처럼 음의 분산 확장기라 볼 수도 있다. 펄스 압축기 설계를 위해 회절격자의 격자 수는 1200 groove/mm, 회절격자의 입사각은 40° , 회절격자 간의 거리는 70 cm 로 설정하고 설계하였다. 증폭기를 통과하여 압축된 펄스 설계 결과는 펄스 폭이 127.4 fs 이고, bandwidth가 10.348 nm 이다. 그리고 펄스 압축기를 지나면서 생긴 손실은 3 dB/m 로 계산하여 그림 2.27처럼 2.879 W 가 나옴을 확인할 수 있었다. 마찬가지로 펄스 확장기처럼 펄스 폭을 압축 시 그림 2.26와 그림 2.28을 비교할 때, bandwidth의 변화는 없었다. 펄스 압축 시 회절 효율이 높은 회절격자를 사용하여 CPA 시스템의 출력을 더 증가시킬 수 있다.

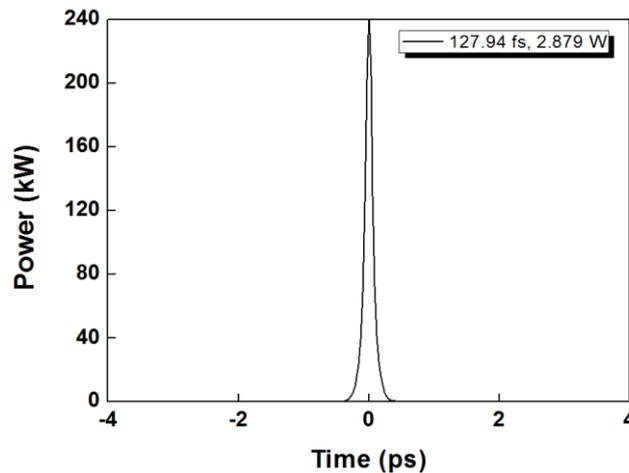


그림 2.27 펄스 압축기 통과 후 출력이 2.879 W 설계.

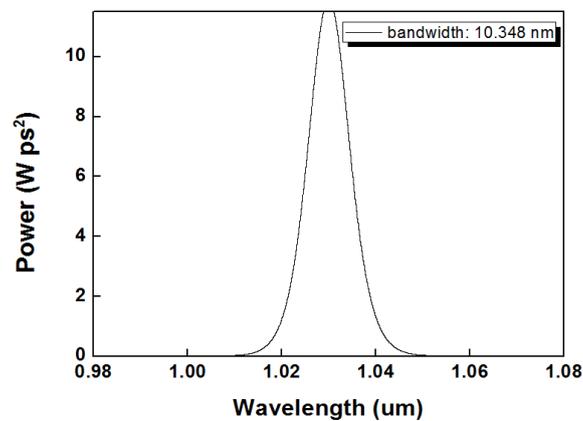


그림 2.28 펄스 압축기 통과 후 bandwidth 설계.

2.5.5. CPA 시스템 구조도 및 설계

펄스 확장기부터 시작해서 1, 2차 광섬유 증폭기, 그리고 펄스 압축기 등 CPA기술에 대한 설계를 하였다. 펄스 확장기의 펄스 폭 확장 정도로 인하여 1, 2차 광섬유 증폭기의 증폭률이 결정되고, 펄스 압축기로 펄스를 압축하였을 때, 광섬유 사용으로 인한 음의 분산이나 SPM 효과 등 전체적으로 고려해야 할 사항들이 많다. 펄스 폭을 많이 확장하지 못하면, 감소하는 출력은 줄어들지만, 광섬유 증폭에서 광섬유의 길이를 길게 해야 하기 때문에, 음의 분산효과나 비선형성 효과가 더욱 증가된다. 이 효과로 인하여 펄스 압축기에서는 원래의 입력 펄스만큼 펄스를 압축시키기가 어려워진다. CPA 시스템 제작에 대한 모든 부분들을 고려하여 펄스 확장기 제작 시 회절격자가 1200 groove/mm 일 때, 40°로 회절격자 입사각을 고정하고, 회절격자가 렌즈에 최대한 가까이 갈 수 있도록 정한 길이가 15 cm 이다. 그리고 CPA 기술을 제작함에 따라 생기는 손실들을 고려하여 1차, 2차 증폭기의 광섬유 길이를 늘려서 출력을 올릴 것이다. 제작할 CPA 기술의 구성도는 그림 2.29와 같다.

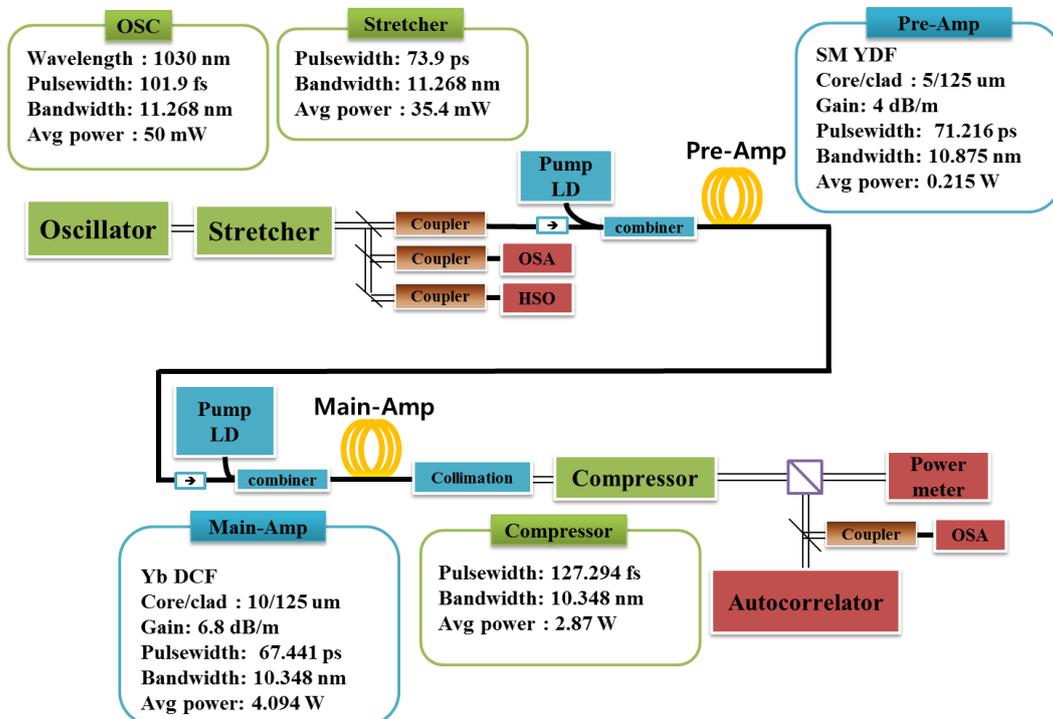


그림 2.29 광섬유 이득매질 CPA 구성도.

제 3 장 실험 장치 및 방법

제 3.1 절 특성 측정용 실험 장치



그림 3.1 Ti:sapphire 레이저.

펄스 확장기에 사용된 장비들을 하나씩 나열해보면, 펄스 확장기에 입사되는 광원은 그림 3.1의 티타늄사파이어 레이저(Mai-Tai, Spectra-Physics)로서, 레이저 광원의 특성은 펄스 폭이 100 fs 이고 파장의 변화가 가능한 690-1040 nm 이다. 800 nm 에서 가장 큰 출력을 내며 평균 출력은 3 W 이고, 본 논문에서 사용한 파장은 1030 nm 로 평균 출력은 0.8 W 이다. 빔 사이즈는 1.2 mm 이며, 수평 편광으로 빔이 출력되고 레이저 광원의 펄스 반복률은 80 MHz 이다. CPA 시스템 구성 시 긴 거리에서도 레이저 광원의 빔 사이즈가 일정한 상태로 퍼지는지 확인하는 것이 중요하다. 그러한 이유는 일정한 형태의 빔이 아닌 점점 커지는 형태의 빔이 들어오게 되면 펄스 확장 시 광학계가 회절되는 빔을 다 수용할 수 없기에, 스펙트럼이 잘릴 수 있다. 그래서 렌즈 두 개를 사용하여 Collimation시켜 빔이 공간상에 일정하게 퍼져 나가도록 장치를 구성하였고, 레이저 광원의 출력을 50 mW 로 설정하기 위해 로테이션 빔 감쇠기

(rotation attenuator)를 설치하였다.

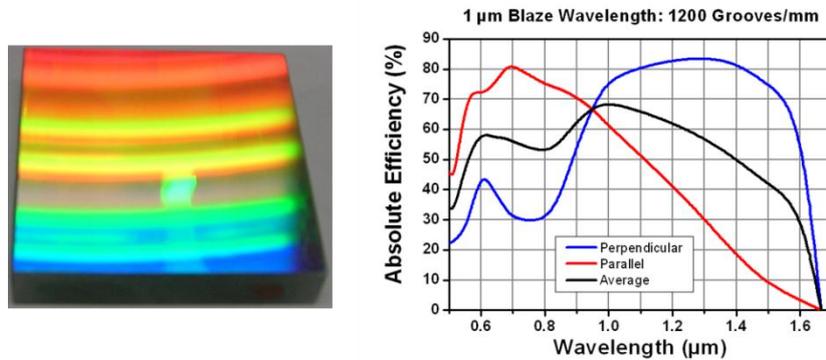


그림 3.2 회절격자와 그 특성.[16]

펄스 확장기 시스템에서 펄스 폭 확장에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 회절격자는 그림 3.2와 같이 Thorlabs사의 Ruled diffraction grating으로써 5 x 5 cm²의 사이즈, 1200[groove/mm]의 격자 수와 36.88°의 Littrow각도를 지니고 있다. 특히 회절격자의 특성이 수직 입사될 때 회절 빔의 효율이 가장 높다.

펄스 확장기를 거쳐 확장된 펄스 폭을 측정하는 실험장비는 그림 3.3과 같은 Femtocrome회사의 FR-103XL인 autocorrelator이다. 이 autocorrelator는 2장에 언급하였던 것처럼 Michelson간섭계 방식을 이용하여 SHG된 빔과 원래 펄스의 시간 차를 이용하여 펄스의 폭을 재는 방법이다. 이 장비의 특성은 측정할 수 있는 파장 범위가 700 ~ 1100 nm 이고, KDP nonlinear crystal을 사용하여 SHG를 생성하였고, 반치폭(Full width half maximum, FWHM)은 ~90 ps 까지 측정할 수 있다.

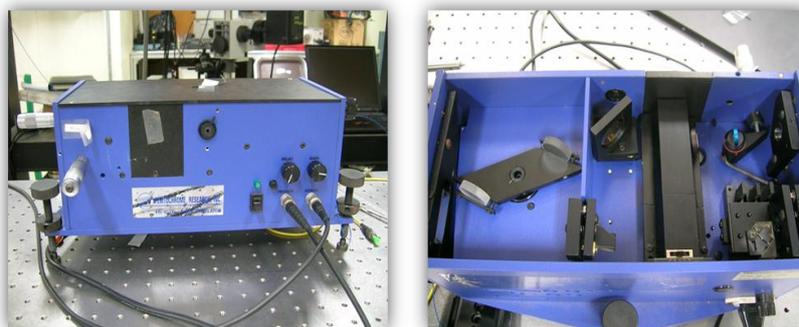


그림 3.3 ~90 ps 까지 측정가능한 Autocorrelator.

또한, 증폭기 제작을 위해 사용한 실험 장치로는 그림 3.4의 Ericsson 회사의 FSU 995 splicer 를 사용하여 광섬유 간에 융합을 하였다.



그림 3.4 광섬유 융합접속 장비.

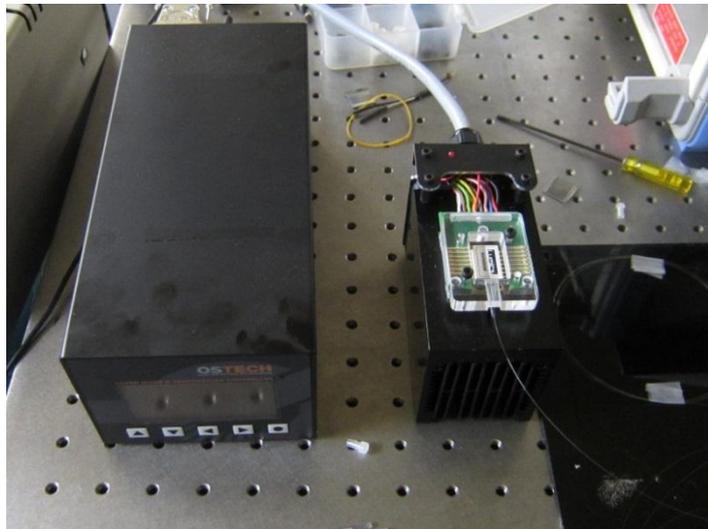


그림 3.5 증폭 시 사용된 975 nm 펌프 LD.

그림 3.5의 펌프 LD는 OS TECH 회사의 제품을 사용하였고, 이 제품의 특성은 펌프 파워가 0 ~ 330 mW 이고, 전류는 0 ~ 575 mA 이다.

제 3.2 절 Treacy-Type 펄스 확장기 설계 및 제작

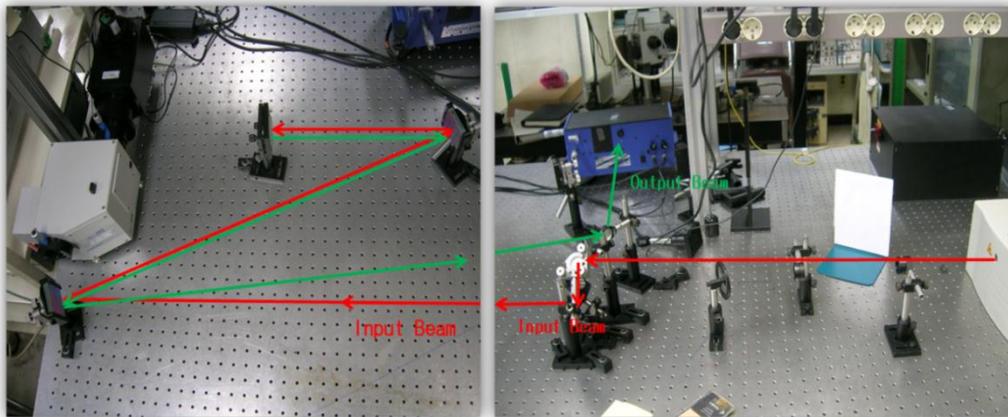


그림 3.6 Treacy-Type 펄스 확장기의 구조.

2장에서 언급하였던 CPA 시스템의 첫 단계인 펄스 확장기를 그림 3.6과 같이 구성하여 제작하였다. 회절격자와 펄스 확장기의 광경로는 그림 3.7와 같다. 또한 레이저 광원의 출력 펄스가 수평 편광이어서 편광을 조절하기 위해 평면거울 두 개를 가지고 빔을 90°로 꺾어 수직 편광으로 변화시켜 첫 번째 회절격자에 입사하도록 구성하였다.

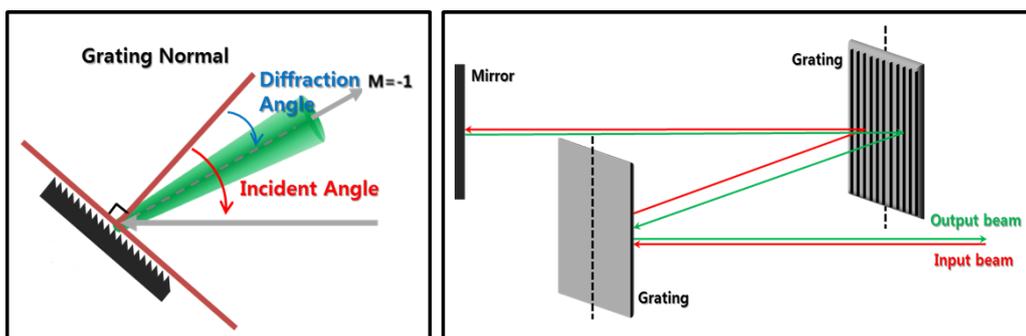


그림 3.7 회절격자와 펄스 확장기의 광경로.

펄스 확장기를 제작하기 전에 회절격자의 각도와 회절격자의 거리에 대한 데이터를

가지고 펄스 폭 확장 정도를 앞 장의 기본 이론을 가지고 계산하여 설계하였다. 펄스 폭의 확장은 펄스 증폭기에서 에너지 전이효율과 직접적인 연관성을 갖기 때문에 펄스 폭이 많이 확장되면 될수록 좋다. 하지만 CPA 시스템의 침투 출력과 사이즈를 고려하여 펄스 확장기의 구조를 제작하는 것이 좋다. 그래서 광원에서 출력된 펄스가 펄스 확장기를 지나가면서 확장된 펄스는 펄스 증폭기를 통해 펄스 폭만큼의 에너지가 전체적으로 올라가기 때문에 콤팩트한 CPA 시스템을 구축하기 위해 펄스 폭 확장 정도를 펄스 확장기 제작 전에 알아야 한다. Treacy-Type 펄스 확장기를 설계하고 제작하였다. 먼저 펄스 확장기 설계를 진행한 후, 설계 값과 측정치를 비교하였다.

100 fs 입력 펄스가 회절격자에 입사되는 각도를 70° 로 고정하고, 회절격자 간의 거리를 5 cm 에서 펄스 폭 확장 정도를 설계한 결과 그림 3.8과 같다. 각도 70° 와 거리를 5 cm 로 정한 이유는 실제 제작에서 펄스 폭을 최대한 작게 확장할 수 있는 펄스 확장기 제작을 위해 회절격자 간의 거리를 측정해보니, 최소 거리가 5 cm 였다. 첫 번째 회절격자에 입사되는 각을 70° , 회절격자 간의 거리가 5 cm 일 때 설계한 결과 반치폭은 2.85 ps 이었다.

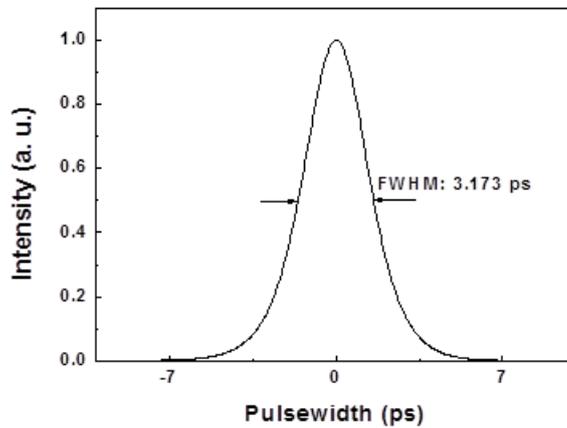


그림 3.8 입사각 70° , 5cm 펄스 폭 확장 설계.

그림 3.8의 설계 데이터를 토대로 제작한 펄스 확장기는 회절격자 간의 거리가 5 cm, 첫 번째 회절 격자에 입사하는 각도를 70° 를 잡고 제작한 후 확장된 펄스 폭을 autocorrelator로 측정한 결과 4.42 ps 로 펄스 폭이 확장됨을 알 수 있었다.

제 3.3 절 Martinez-Type 펄스 확장기 설계 및 제작

Treacy-Type 펄스 확장기 제작을 통해 회절격자 간의 거리와 회절격자에 입사하는 각도에 따라 펄스가 확장되는 정도를 측정할 수 있었다.

그러나 앞의 펄스 확장기는 제작에 쉬운 장점이 있지만, 전체적인 CPA 시스템을 제작 시 펄스 압축기 구성이 2장 이론에서 설명한 Martinez 구조로 제작하기 어렵고, 펄스 압축기 구성 시 보다 많은 광학 부품들이 들어가므로 출력에 영향을 줄 수 있다. 그래서 이번에는 2장에서 설명한 망원경 구조를 이용한 Martinez 구조의 펄스 확장기에 대해서 설계하고 제작하였다. Martinez-Type 펄스 확장기도 앞서 제작된 Treacy-Type 펄스 확장기와 같은 회절격자를 이용하여 그림 3.9와 같이 구성하여 제작하였다. 회절격자와 펄스 확장기의 광경로는 그림 3.10와 같다. 또한 레이저 광원의 출력 펄스가 수평 편광이어서 편광을 조절하기 위해 Half wave plate를 이용하여 빔을 90°로 꺾어 수직 편광으로 변화시켜 첫 번째 회절격자에 입사하도록 구성하였다. 특별히 이 펄스 확장기는 렌즈를 사용하였는데, 초점거리가 512 mm 이며, 구경은 5 cm 이다. 일반적인 Martinez 구조에서 렌즈 사이에 거울을 설치하여 반 접은 형태의 펄스 확장기로서 설계 및 제작하였다.

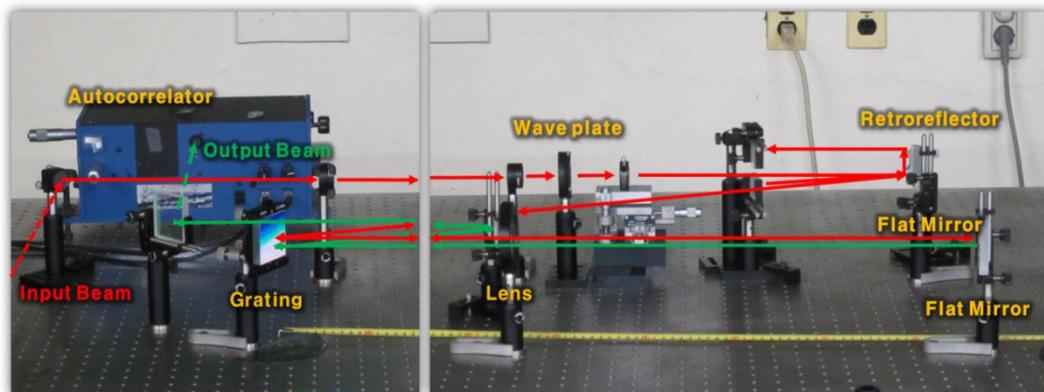


그림 3.9 Martinez-Type 펄스 확장기의 구조.

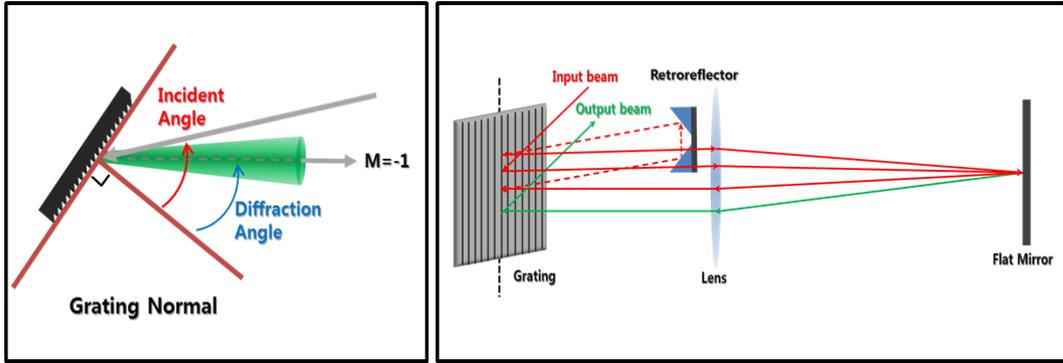


그림 3.10 회절격자와 펄스 확장기의 광경로

이론에 설명한대로 Martinez-Type 펄스 확장기는 음의 분산을 보상하기 위해 회절격자와 렌즈간의 거리를 초점거리보다 가깝게 설치하여 음의 거리 값을 주기 때문에 양의 분산이 이루어진다. 주파수 성분이 시간지연에 따라 장파장(빨강)이 앞쪽에 단파장(보라)이 성분은 뒤쪽에 오도록 하는 양분산형의 펄스 확장기이다. 본 논문에서는 이 펄스 확장기를 그림 3.11과 같이 한 개의 회절격자와 렌즈, 평면거울, retroreflector를 사용하여 설계 및 제작하였다.

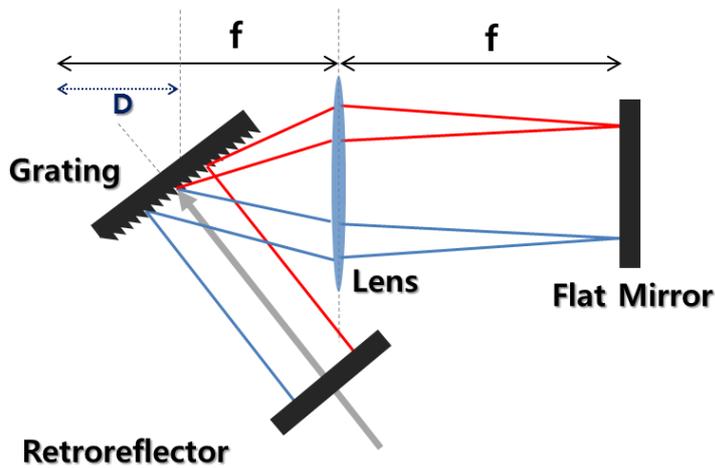


그림 3.11 Martinez-Type 펄스 확장기 개념도.

그림 3.11를 통해 알 수 있듯이 기존의 Martinez 구조에서 렌즈 사이에 있는 거울의 반사효과로 인하여 회절격자와 렌즈의 수를 줄이면서 펄스 확장기의 사이즈도 줄일

수 있는 장점을 가지고 있다. 먼저 펄스 확장기 설계를 진행한 후 설계 값과 실험 값을 비교하기 위해 펄스 확장기를 제작하였다. 100 fs 입력 펄스가 회절격자에 입사되는 각도를 50° 로 고정하고, 회절격자와 렌즈 사이의 거리를 20 cm로 두고 펄스 폭 확장 정도를 설계한 결과 그림 3.12와 같다. 설계한 결과 반치폭은 48.066 ps 이었다

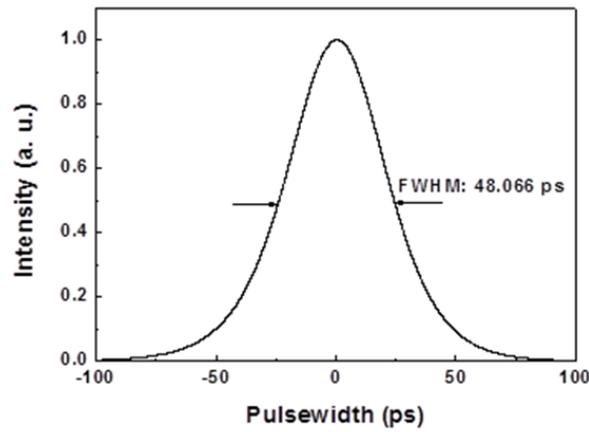


그림 3.12 50° , 20cm 펄스 폭 확장 설계.

그림 3.12의 설계 데이터를 토대로 제작한 펄스 확장기는 설계와 마찬가지로 설정한 후, 제작하여 확장된 펄스 폭을 autocorrelator로 측정한 결과 그림 3.13과 같이 50.6 ps로 펄스 폭이 확장됨을 알 수 있었다.

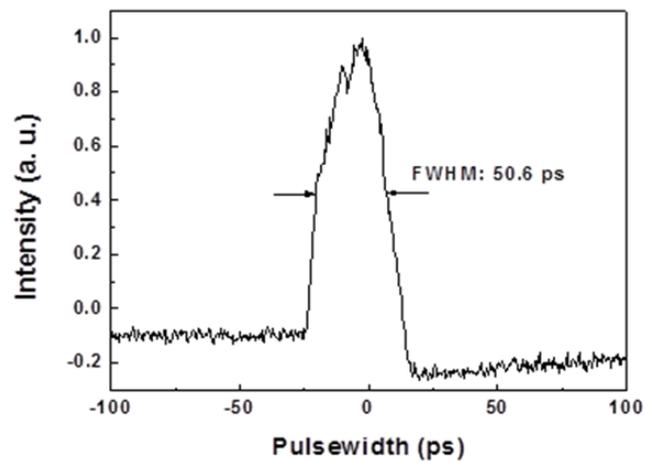


그림 3.13 펄스 확장기 통과 후 펄스 폭 측정.

제 3.4 절 Öffner-Type 펄스 확장기 설계 및 제작

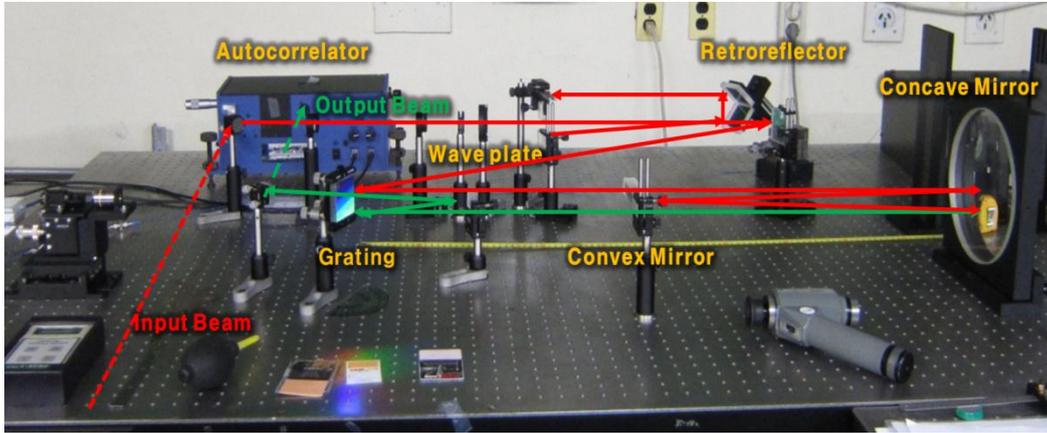


그림 3.14 Öffner-Type 펄스 확장기의 구조.

그림 3.14와 같이 회절격자와 Concave mirror, Convex mirror를 사용하여 Öffner 구조를 제작하였다. Concave mirror 는 1024 mm 의 초점거리를 가지며, 둘레가 20 cm spherical mirror 형태이며, Convex mirror 는 512 mm 의 초점거리를 가지며, 크기가 12 cm X 1 cm 인 cylindrical mirror 를 사용하여 펄스 확장기를 제작하였다. 그림 3.15와 같이 광경로를 설정하였고, 회절격자는 이전의 펄스 확장기에서 사용한 회절격자 수와 같다.

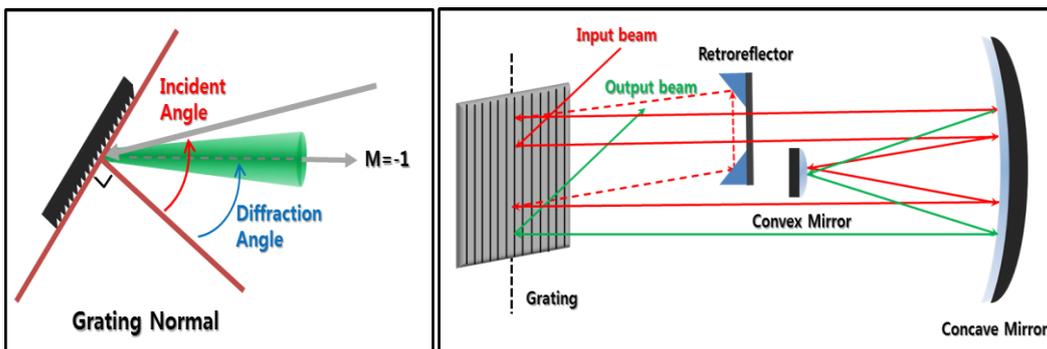


그림 3.15 회절격자와 펄스 확장기의 광경로. [36]

Öffner-Type 펄스 확장기 이론에서 설명한 식(2-21~30)의 식을 통해 수차항의 값을 최소화하면서 b의 값 회절격자와 허상 회절격자 이미지 사이의 거리 값을 매트랩을 사용하여 시뮬레이션하였다.

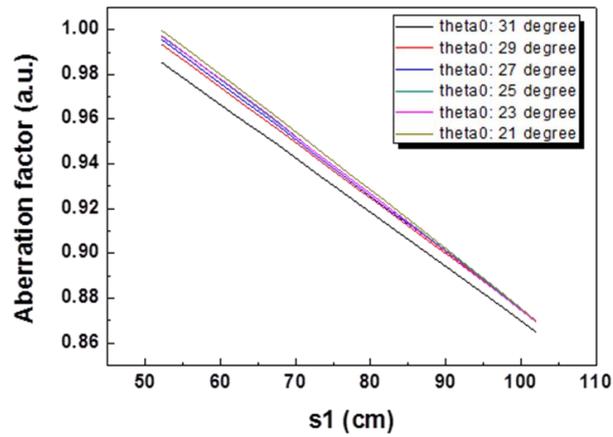


그림 3.16 수차항에 대한 설계.

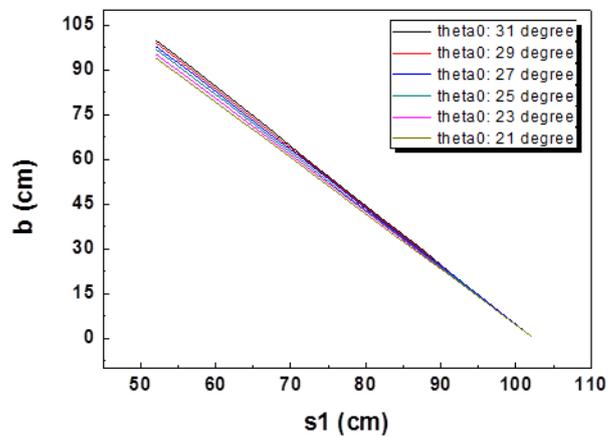


그림 3.17 s1에 따른 b의 변화.

수차항에 대한 설계 결과 그림 3.16에서 Concave mirror와 회절격자의 거리 s1의 거리가 60 cm 이고, Concave mirror의 system axis(center)의 각도가 31° 일 때, 수차 값이 가장 작으며 그림 3.17을 통해 s1의 거리가 60 cm 이고, Concave mirror의

system axis(center)의 각도가 31° 일 때, b의 값이 가장 큼을 확인할 수 있었다. 만약 s1의 값이 61 cm 일 때 펄스 폭 확장을 알기 위해 입사각 40° , 회절격자 수 1200 groove 에서 펄스 폭이 그림 3.18과 같은 105.57 ps 인 원래의 입력 펄스에서 1000배 정도 확장할 수 있음 확인하였다.

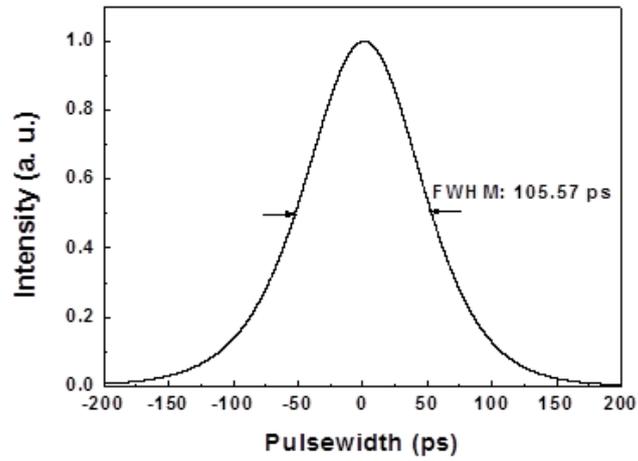


그림 3.18 펄스 확장기 통과 후 펄스 폭.

제 4 장 실험 결과 및 분석

회절격자에 입사하는 각도가 70° 인 음분산형인 Treacy-Type 펄스 확장기와 50° 에서 양분산형인 Martinez-Type 펄스 확장기, 그리고 Öffner-Type 펄스 확장기를 제작하고 측정된 데이터와 2장에서 설명한 펄스 확장기의 이론을 통하여 확장된 펄스 폭의 설계치를 비교할 수 있었다. 입사각 70° 인 Treacy-Type 펄스 확장기에서는 회절격자 간의 거리가 많이 떨어진 상태에서 회절격자의 입사각도를 70° 이상 늘리고, 30° 이하 작게 하는 것이 설계에서는 가능했지만, 실험에서는 모든 입사각에 대해서 고려하지 않고, 회절격자의 효율이 가장 좋은 각도를 기준으로 하여 제작하였다. autocorrelator로 펄스 폭 확장을 측정할 수 있는 한계치까지 확장하기 위해 각각의 각도에 따라 회절격자 간의 거리를 변화시키면서 설계치와 측정치를 비교 분석하였고, 40° 일 때, 거리를 조절하면서, 펄스 확장기를 구성하여 회절격자 간의 거리의 변화에 따른 데이터를 얻었고, 마찬가지로 50° 일 때 거리를 조절하면서 펄스 확장기를 구성하여 회절격자 간의 거리의 변화에 따른 데이터를 얻었다. 그래서 40° 와 50° 에 대한 설계치와 측정치 데이터를 각각 비교하여 펄스 폭이 얼마나 확장되었는지 설명하도록 하겠다. 또한 Martinez-Type 펄스 확장기도 마찬가지로 회절격자의 입사각이 40° 일 때 거리를 조절하면서, 펄스 확장기를 구성하여 회절격자와 렌즈 사이의 거리 변화에 따른 데이터를 얻었고, 마찬가지로 50° 일 때 거리를 조절하면서 펄스 확장기를 구성하여 회절격자 간의 거리의 변화에 따른 데이터를 얻었다. 그래서 40° 와 50° 에 대한 설계치와 측정치 데이터를 각각 비교하여 펄스 폭이 얼마나 확장되었는지 설명하도록 하겠다. 그리고 회절격자와 렌즈를 사용한 양분산형 펄스 확장기에서 회절격자와 렌즈 사이의 거리가 가까워질수록 빔의 스펙트럼이 잘리는 부분에 대해 해결책으로 양분산형인 Öffner-Type 펄스 확장기에 대해 측정된 데이터들과 YDF를 이용하여 제작한 펄스 증폭기의 특성에 대해 설명하도록 하겠다.

제 4.1 절 Treacy-Type 펄스 확장기 특성 측정 및 분석

첫 번째 실험 조건은 입력 펄스가 첫 번째 회절격자에 입사되는 40° 로 고정시키고 펄스 확장기를 제작하는 것이고, 두 번째 실험 조건은 고정된 각도를 기준으로 하여 회절격자 간의 거리를 변화시켰다. 먼저 설계를 통해 각각의 거리에 따른 펄스 확장기에 대한 데이터를 얻은 후 제작하여 측정하였다. 회절 격자간의 거리가 10 cm 일 때, 설계치는 10 ps 정도로 입력 펄스에 비해 110배 확장되었으며, 측정치는 7.6 ps 로 80배 확장되었다. 마찬가지로 회절격자 간의 거리를 더 늘려 30 cm 로 제작했을 때, 설계치는 32 ps 였고, 입력 펄스에 비해 340배 되었으며, 측정치는 30 ps 로 320배 확장되었다. 회절 격자 간격이 50 cm 인 경우에는 설계치는 52.4 ps 이고, 측정치는 53.3 ps 로 확장됨을 알 수 있었다. 이에 대한 내용을 간단하게 정리한 것이 표 4.1이고, 이 자료를 바탕으로 비교분석을 쉽게 하기 위해 그림 4.1을 작성하였다.

	거리		
	10 cm	30 cm	50 cm
각도	40°	40°	40°
설계치	10 ps	32 ps	52.4 ps
측정치	7.6 ps	29.8 ps	53.7 ps

표 4.1 입사각 40° , 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표 (입력 펄스-95 fs).

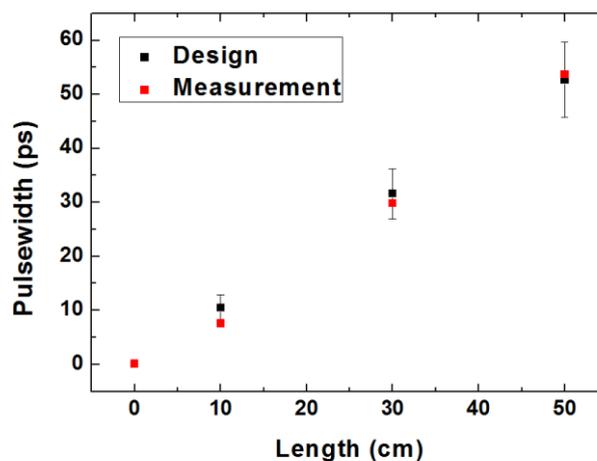


그림 4.1 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석.

그림 4.1을 보면 회절격자에 입사하는 빔을 입사각 40° 로 고정하고 회절격자 간의 거리를 변화시켰을 때, 설계치와 측정치에 대한 펄스 폭 확장의 오차범위가 ± 3 ps 정도인 최적화된 펄스 확장기 구조임을 알 수 있다. 또한 펄스 확장기를 통과하여 확장된 펄스를 OSA로 펄스의 스펙트럼(bandwidth)를 측정하였는데, 미세한 변화가 있음을 그림 4.2에서 확인할 수 있다. 스펙트럼이 약간 변하는 이유는 입사각이 작아지고 거리가 멀어질수록 회절되는 빔이 많이 퍼지기 때문에 첫 번째 회절격자를 맞고 두 번째 회절격자를 맞고 거울을 통해 반사되어 돌아오면서 두 번째 회절격자에 빔이 약간 잘려 맞기 때문이다.

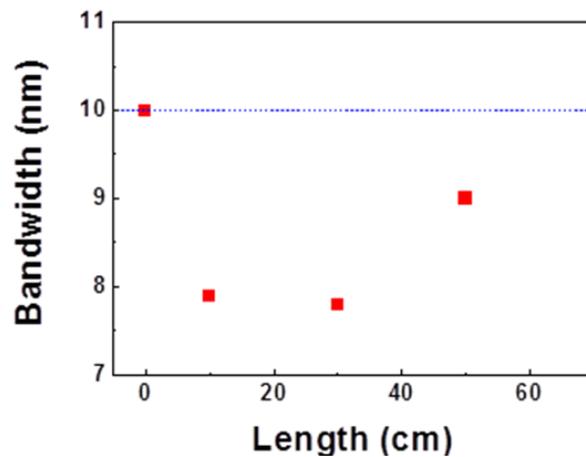


그림 4.2 확장된 펄스의 스펙트럼.

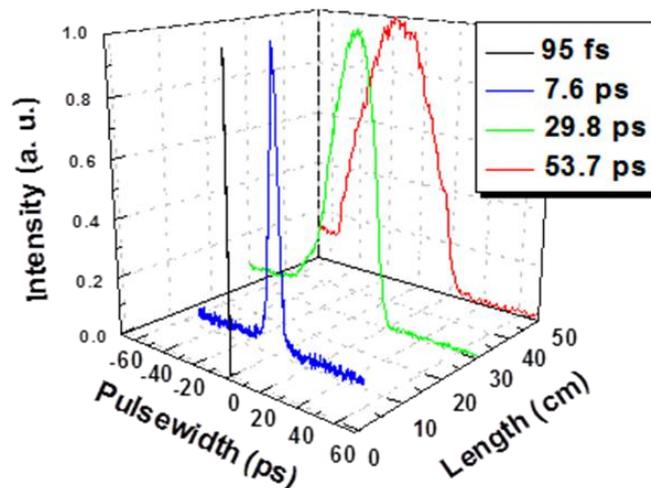


그림 4.3 3D image로 보는 40° , 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭.

다음은 40°에서 회절격자 간의 거리 변화에 따라 펄스 폭의 확장되는 것을 한눈에 보기 위해 그림 4.3처럼 3D 이미지로 처리하여 펄스 폭이 회절격자 간의 거리에 따라 확장되는 모습을 보았다.

위의 데이터들을 통해서 음분산형 펄스 확장기 제작 시 회절격자 간의 내에서 발생한 간격 오류나 회절격자에 입사하는 빔의 미세각도 조절 문제를 고려하여 40°에서의 펄스 확장기 제작 시 필요한 광학계의 사이즈를 설계를 통해 알아낸 후 제작하는 것이 필요하다.

다음은 40°에서 실험한 것처럼 입사각을 50°로 고정한 상태에서 음분산형 펄스 확장기를 제작한 경우이다. 첫 번째 실험 조건은 입력 펄스가 처음 회절격자에 입사각을 50°로 고정하여 제작하는 것이고, 두 번째 실험 조건은 고정된 각도에서 회절격자 간의 거리의 변화를 시켰다. 먼저 설계를 통해 각각의 거리에 따른 펄스 확장기에 대한 데이터를 얻은 후 제작하였다. 회절격자 간의 거리가 10 cm 일 때, 설계치는 7.9 ps 정도로 입력 펄스에 비해 82배 확장되었으며, 측정치는 7.6 ps 로 79배 확장되었다. 회절격자 간의 거리를 더 늘려 30 cm 로 제작했을 때, 설계치는 24 ps 였고, 입력 펄스에 비해 250배 확장되었으며, 측정치는 22.1 ps 로 230배 확장되었다. 회절격자 간의 거리를 더 늘려 50 cm 로 제작했을 때, 설계치는 40 ps 였고, 입력 펄스에 비해 416 배 확장되었으며, 측정치는 42.6 ps 로 443배 확장되었다. 마찬가지로 회절격자 간격이 70 cm 인 경우에는 설계치는 56.1 ps 이고, 측정치는 54.6 ps 로 확장됨을 알 수 있다. 이에 대한 내용을 간단하게 정리한 것이 표 4.2이고, 비교분석을 쉽게 하기 위해 그림 4.4를 작성하였다.

	거리			
	10 cm	30 cm	50 cm	70 cm
각도	50°	50°	50°	50°
설계치	7.9 ps	24 ps	40 ps	56.1 ps
측정치	7.6 ps	22.1 ps	42.6 ps	54.6 ps

표 4.2 입사각 50°, 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표 (입력 펄스- 95 fs).

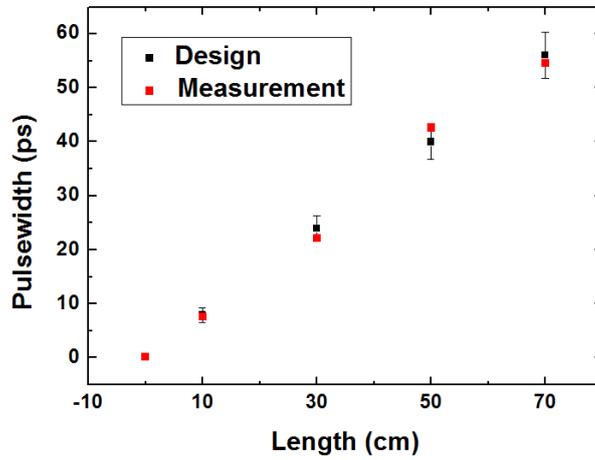


그림 4.4 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석.

회절격자에 입사되는 입사각이 50° 에서 회절 격자 간의 거리를 50 cm 가 아닌 70 cm 까지 늘린 이유는 40° 의 펄스 확장기와 더 명확하게 비교하기 위해서이다. 그림 4.4를 통하여 설계치와 측정치에 대한 오차범위가 약 ± 3 ps 정도인 최적화된 펄스 확장기를 제작하였다. 또한 펄스 확장기에 대한 펄스 폭을, OSA를 사용하여 펄스의 스펙트럼을 측정하여 회절격자 간의 거리에 따른 스펙트럼의 변화가 그림 4.5를 보면 거의 일어나지 않았다.

전 장의 40° 에서의 측정한 펄스 확장기와 달리 스펙트럼의 변화가 거의 없는 이유는 40° 에서 회절되는 빔의 정도가 더 낮기에 회절격자에서 잘리는 문제가 발생하지 않았다.

50° 에서 회절격자 간의 거리 변화에 따라 펄스 폭의 확장되는 것을 한눈에 보기 위해 그림 4.6처럼 3D 이미지로 처리하여 펄스 폭이 회절격자 간의 거리에 따라 확장되는 모습을 보았다. 하지만 그림에서 알 수 있듯이 50° 에서는 회절 격자간의 거리가 많이 멀어짐에 따라 회절격자간의 거리 대 펄스 폭 확장의 비율이 점점 작아지는 것을 알 수 있다.

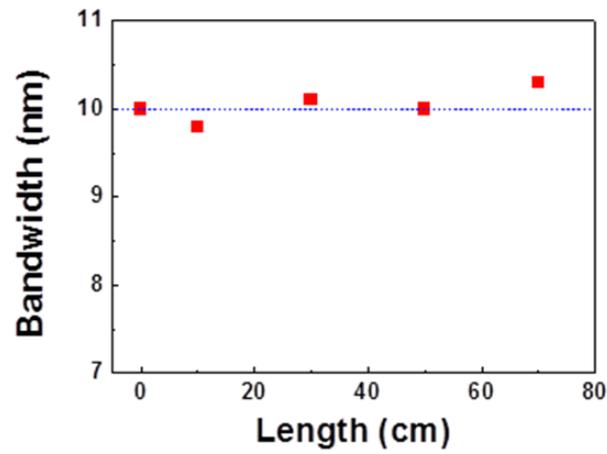


그림 4.5 확장된 펄스의 스펙트럼.

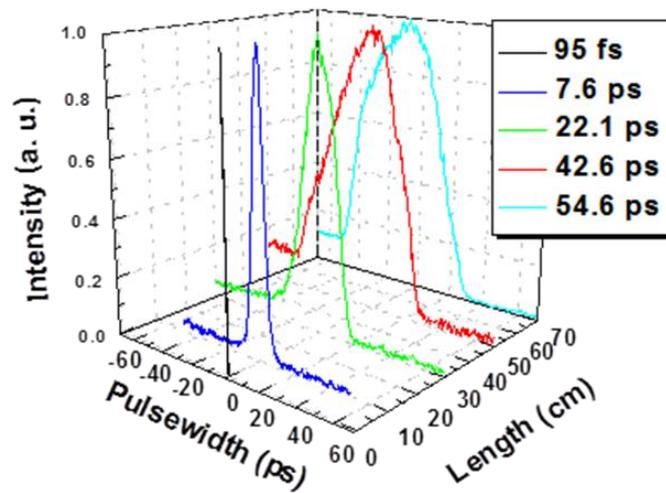


그림 4.6 3D image로 보는 50°, 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭.

위의 데이터들을 통해서 회절 격자 간의 거리가 늘어남에 따라 펄스 폭이 확장되어도 펄스의 스펙트럼 변화가 거의 없는 안정적인 펄스 스펙트럼임을 알 수 있다. 펄스의 안정적인 스펙트럼을 통하여 50°에서 잘 제작된 펄스 확장기 구조임을 알 수 있다.

앞서 얻은 데이터를 토대로 두 입사각 40° 와 50° , 그리고 회절격자 간의 거리 변화에 따라 제작된 펄스 확장기의 특성 결과를 비교하였다. 거리가 10 cm 일 때 40° , 50° 에서 제작된 펄스 확장기의 경우, 펄스 폭 확장 정도는 7.6 ps 로 거의 비슷함을 알 수 있다. 그 이유는 회절격자 간의 거리의 간격이 매우 짧아 펄스 폭 확장에 거의 영향을 끼치지 않은 것이라 생각된다. 회절격자 간의 거리가 점점 멀어지게 되면서 30 cm 에서는 40° 에서 제작된 펄스 확장기가 50° 에서 제작된 펄스 확장기보다 펄스 폭의 확장이 7 ps 더 확장됨을 알 수 있었다. 그러한 이유는 2장에 기본 이론에서 설명한 것처럼, 회절격자에 입사되는 각이 회절격자의 중심축을 기준으로 작아지게 되면서 회절격자에서 반사되어 나오는 회절 빔의 각은 더 커지고, 회절 빔의 각이 식(2-15)를 통하여 펄스 폭이 더 많이 확장됨을 알 수 있다. 그래서 40° 에서 회절격자 간의 거리가 50 cm 인 펄스 확장기와 50° 에서 회절격자 간의 거리가 70 cm 인 경우 확장된 펄스 폭을 비교하면 펄스 폭 확장 정도가 둘 다 53~54 ps 로 거의 비슷함을 알 수 있다. 또한, 펄스 확장기에서 회절 격자 간의 거리도 펄스 폭 확장에서 중요한 변수였지만, 두 개의 구조를 비교하면서 50° 에서 측정한 펄스 확장기의 경우 일정한 각도를 고정한 상태에서 회절격자 간의 거리 변화에 따라 펄스 폭을 확장시킬 수 있는 한계가 존재하였다. 그렇기에 회절격자에 입사하는 입사각도를 더 줄이고, 대신에 회절격자 간의 거리를 최대한 늘려 펄스 폭을 수십 ps~ 수백 ps 까지 확장할 수 있는 Treacy-Type 펄스 확장기 제작이 가능할 것으로 보인다. 하지만 40° 에서 제작된 펄스 확장기를 통과한 펄스 스펙트럼의 경우, 펄스의 스펙트럼이 미세한 변동이 일어난 것처럼 입사각이 더 작은 펄스 확장기를 제작 시, 앞서 제작한 펄스 확장기에 대한 노하우를 토대로 더 세밀한 광학계의 정렬 및 설치가 필요하다. 또한 회절격자의 사이즈와 격자 수를 조절하여 펄스 확장기를 제작하면 CPA 시스템 구성 시 컴팩트한 사이즈를 가진 펄스 확장기 제작이 가능할 것으로 보인다.

제 4.2 절 Martinez-Type 펄스 확장기 특성 측정 및 분석

첫 번째 실험 조건은 입력 펄스가 첫 번째 회절격자에 입사되는 40° 로 고정시키고 펄스 확장기를 제작하는 것이고, 두 번째 실험 조건은 고정된 각도를 기준으로 하여 회절격자와 렌즈의 거리를 변화시켰다. 먼저 설계를 통해 각각의 거리에 따른 펄스 확장기에 대한 데이터를 얻은 후 제작하여 측정하였다. 회절 격자와 렌즈의 거리가 45 cm 일 때, 2장에서 언급했듯이 실제 회절격자와 회절격자의 이미지 사이의 거리는 10 cm 가 된다. 설계한 결과 10.6 ps 정도로 입력 펄스에 비해 110배 확장되었으며, 측정치는 15.2 ps 로 160배 확장되었다. 마찬가지로 회절격자와 렌즈의 거리를 가 35 cm 로 제작했을 때, 설계치는 31.6 ps 였고, 입력 펄스에 비해 330배 되었으며, 측정치는 30.7 ps 로 320배 확장되었다. 회절 격자와 렌즈의 거리가 25 cm 인 경우에는 설계치는 52.8 ps 이고, 측정치는 45.2 ps 로 확장됨을 알 수 있었다. 이에 대한 내용을 간단하게 정리한 것이 표 4.3이고, 이 자료를 바탕으로 비교분석을 쉽게 하기 위해 그림 4.7을 작성하였다.

	거리		
	10 cm	30 cm	50 cm
각도	40°	40°	40°
설계치	10.6 ps	31.6 ps	52.8 ps
측정치	15.2 ps	30.7 ps	45.2 ps

표 4.3 입사각 40° , 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표 (입력 펄스-95 fs).

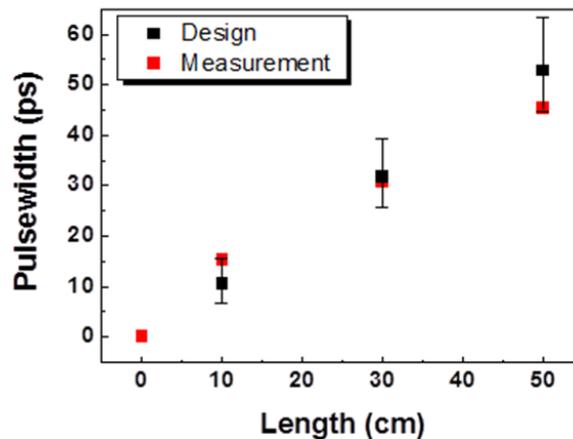


그림 4.7 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석.

그림 4.7을 보면 회절격자에 입사하는 빔을 입사각 40° 로 고정하고 회절격자 간의 거리를 변화시켰을 때, 설계치와 측정치에 대한 펄스 폭 확장의 오차범위가 ± 7 ps 정도인 펄스 확장기 구조임을 알 수 있었는데, 그 이유는 음분산형 펄스 확장기와 다르게 렌즈와 미러를 사용하여 구성하기 때문에 오차범위가 약간 더 크다. 그래서 오차범위를 입사각 $\pm 3^\circ$, 회절격자와 렌즈의 거리 ± 1.5 cm 로 두어 설계한 결과 측정치가 설계치의 오차범위 안에 들어옴을 확인할 수 있었다. 또한 펄스 확장을 통과하여 확장된 펄스 폭을 OSA로 펄스의 스펙트럼을 측정하여, 그림 4.8와 같은 데이터를 얻었다.

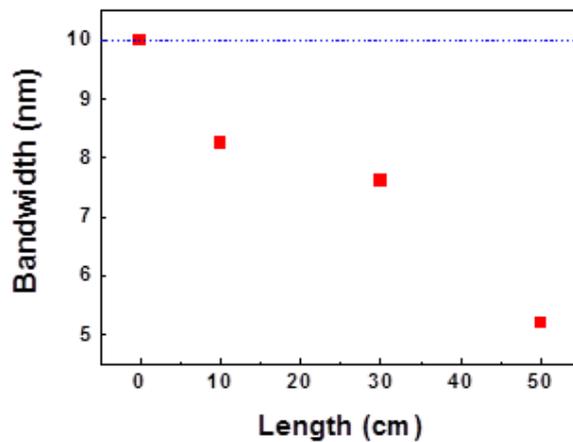


그림 4.8 확장된 펄스의 스펙트럼.

스펙트럼이 거리의 변화에 따라 감소하는 이유는 회절격자와 렌즈 사이의 거리가 가까워 질수록 회절되는 빔이 더 많이 퍼지기 때문에 거울을 맞고 돌아오는 빔이 렌즈의 사이즈로 인해 잘린 것을 IR카메라로 확인하였고, 이 이유로 인하여 스펙트럼이 감소되었다. 입사각 40° 에서 회절격자와 렌즈 사이의 거리 변화에 따라 펄스 폭의 확장되는 것을 한눈에 보기 위해 그림 4.9처럼 3D 이미지로 처리하여 펄스 폭이 확장되는 모습을 쉽게 볼 수 있다.

Treacy-Type 펄스 확장기보다 Martinez-Type 펄스 확장기 제작이 더 어려운데 그 이유는 Treacy-Type 펄스 확장기에 비해 광학계가 더 많이 사용되므로 회절격자와 렌즈 사이의 간격 오류나 렌즈와 거울 사이의 간격 오류, 회절격자에 입사하는 빔의 미세 각도 조절 문제 등 고려할 사항이 많아 40° 에서의 펄스 확장기 제작 시 세밀한 광학계 정렬이 필요하다.

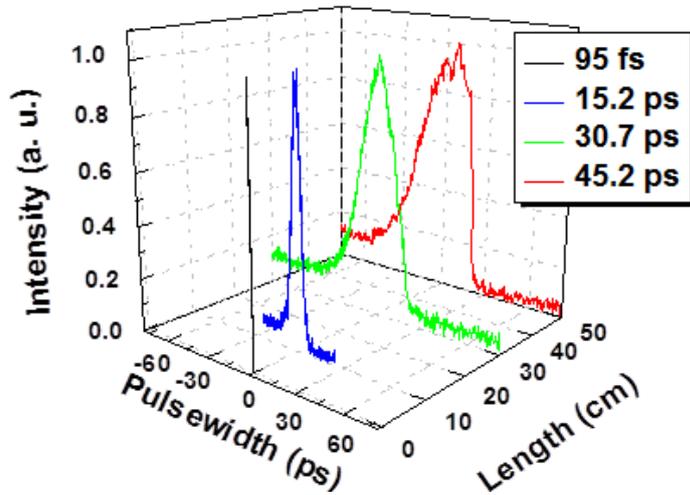


그림 4.9 3D image로 보는 40°, 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭.

40°에서 실험한 것처럼 마찬가지로 50°도 같은 조건으로 제작하였다. 첫 번째 실험 조건은 입력 펄스가 처음 회절격자에 입사각을 50°로 고정하여 제작하는 것이고, 두 번째 실험 조건은 고정된 각도에서 회절격자 간의 거리의 변화를 시켰다. 먼저 설계를 통해 각각의 거리에 따른 펄스 확장기에 대한 데이터를 얻은 후 제작하였다. 회절 격자와 렌즈의 거리가 45 cm 일 때, 설계치는 8.01 ps 정도로 입력 펄스에 비해 84배 확장되었으며, 측정치는 10.3 ps 로 108배 확장되었다. 회절격자와 렌즈의 거리를 35 cm 로 제작했을 때, 설계치는 24 ps 였고, 입력 펄스에 비해 250배 확장되었으며, 측정치는 20.7 ps 로 217배 확장되었다. 회절격자와 렌즈의 거리를 25 cm 로 제작했을 때, 설계치는 40 ps 였고, 입력 펄스에 비해 416배 확장되었으며, 측정치는 42.3 ps 로 445 배 확장되었다. 이에 대한 내용을 간단하게 정리한 것이 표 4.4이고, 비교분석을 쉽게 하기 위해 그림 4.10를 작성하였다.

	거리		
	10 cm	30 cm	50 cm
각도	50°	50°	50°
설계치	8.01 ps	24 ps	40 ps
측정치	10.3 ps	20.7 ps	42.3 ps

표 4-4 입사각 50°, 거리 변화에 따른 펄스 확장 변화표 (입력 펄스- 95 fs).

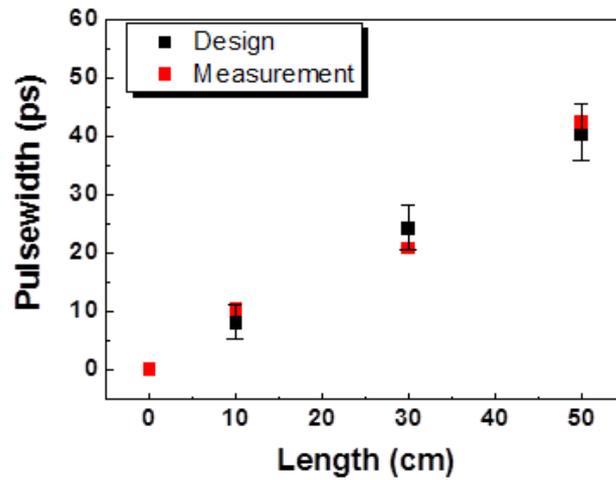


그림 4.10 설계치와 측정치의 확장된 펄스 폭 비교 분석.

그림 4.10을 통하여 설계치와 측정치에 대한 오차범위가 약 ± 3 ps 정도인 펄스 확장기를 제작하였다. 또한 OSA를 사용하여 펄스의 스펙트럼을 측정하여 회절격자와 렌즈의 거리 변화에 따른 스펙트럼에 대한 그림 4.11로 데이터화였다. 전 장의 40° 에서의 측정된 펄스 확장기처럼 회절격자와 렌즈 사이의 거리가 가까워질수록 스펙트럼의 변화가 일어나는 이유는 40° 와 동일하다.

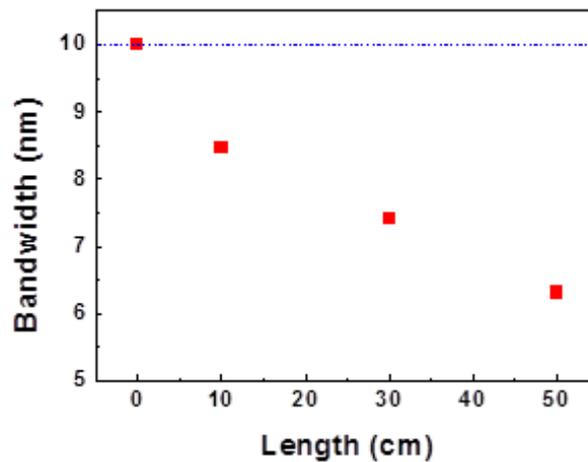


그림 4.11 확장된 펄스의 스펙트럼.

50°에서 회절격자 간의 거리 변화에 따라 펄스 폭의 확장되는 것을 한눈에 보기 위해 그림 4.12처럼 3D 이미지로 처리하여 펄스 폭이 회절격자와 렌즈의 거리에 따라 확장되는 모습을 확인하였다.

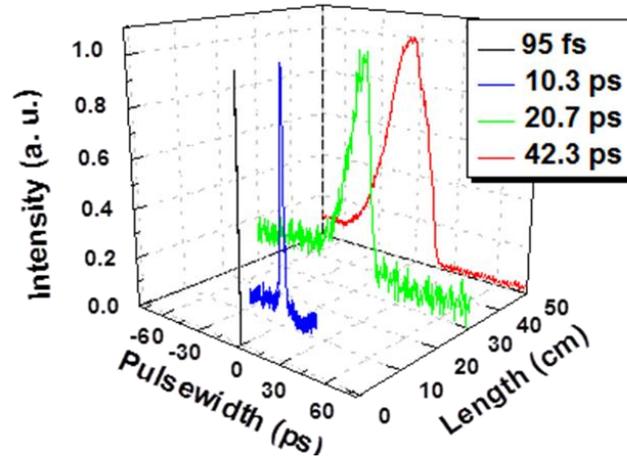


그림 4.12 3D image로 보는 50°, 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭.

앞서 얻은 두 입사각에서의 펄스 폭 확장기에 대한 데이터를 토대로 Martinez-Type 펄스 확장기로서 입사각이 40°와 50°, 그리고 회절격자와 렌즈 사이의 거리 변화에 따라 제작된 펄스 확장기의 특성 결과를 비교하였다. 거리가 10 cm 일 때 40°, 50°에서 제작된 펄스 확장기의 경우, 펄스 폭 확장 정도는 15.2 ps, 10.3 ps 였고, 30 cm 에서는 40°에서 제작된 펄스 확장기가 50°에서 제작된 펄스 확장기보다 펄스 폭의 확장이 10 ps 더 확장됨을 알 수 있었다. 그러한 이유는 앞서 Treacy-Type 펄스 확장기에서 설명한 것처럼, 회절격자에 입사되는 각이 회절격자의 중심축을 기준으로 작아지게 되면서 회절격자에서 반사되어 나오는 회절 빔의 각은 더 커지고, 회절 빔의 각이 식(2-19)를 통하여 펄스 폭이 더 많이 확장되기 때문이다. 또한, Treacy-Type 펄스 확장기처럼 회절 격자와 렌즈 사이의 거리보다 회절격자에 입사되는 각이 펄스 폭 확장에서 중요한 변수였다. 펄스 폭 확장에 대한 데이터는 확보를 하였지만, 두 입사각에서의 펄스 확장기는 그림 4.8와 4.11을 통해 알 수 있듯이 거리 변화에 커질 수록 확장된 펄스의 스펙트럼의 감소가 일어났다. 입사하는 빔의 사이즈를 줄여서 collimation 하려 하였지만, 초점거리가 너무 짧아서 구경이 큰 렌즈와 더 큰 회절격자의 사이즈를 사용해야지만, 어느 거리에서든지 펄스 폭 확장이 가능한

Martinez-Type 펄스 확장기를 제작할 수 있다. 그 이유는 그림 4.13와 4.14를 통해 설명하였다.

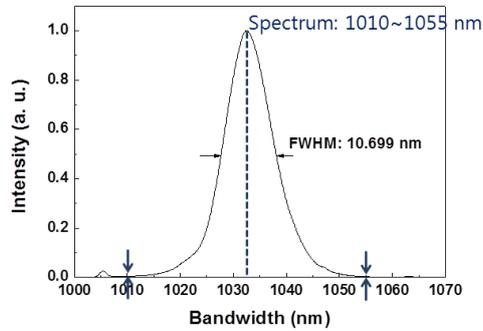


그림 4.13 Ti:sapphire 레이저의 스펙트럼.

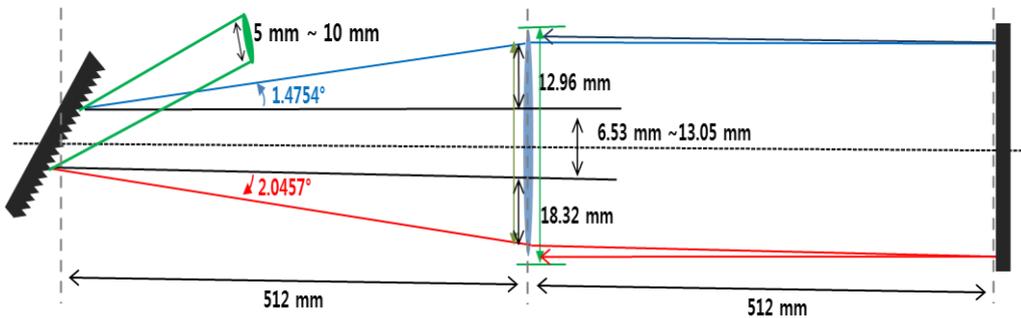


그림 4.14 No stretcher 구조에서 광경로.

그림 4.13를 통해 빔의 사이즈와 빔의 spectral edge를 안다면 양분산형 펄스 확장기에서 빔이 얼마나 퍼지는 지를 계산할 수 있는데, 그림 4.14처럼 펄스 확장하지 않도록 구성 시 회절격자를 통하여 회절된 빔이 렌즈의 사이즈에 걸리지 않게 통과시킬 수 있지만, 거울을 맞고 돌아오면서 빔이 계속 퍼지기 때문에 렌즈 사이즈의 한계로 인해 확장된 빔이 잘리게 된다. 또한 렌즈와 거울을 회절격자에 가까이 갈수록 거울을 맞고 돌아오는 회절된 빔이 훨씬 더 많이 퍼지기 때문에 빔이 더 잘리게 되어 상당한 스펙트럼의 감소가 일어난다. 그렇기 때문에 회절된 빔을 포함시키기 위해 회절격자의 사이즈와 그리고 렌즈와 거울의 사이즈를 조절하여 펄스 확장기를 제작하면 안정적인 스펙트럼을 갖는 펄스 확장기 제작이 가능할 것으로 보인다.

제 4.3 절 Öffner-Type 펄스 확장기 특성 측정 및 분석

Öffner-Type 펄스 확장기를 제작할 때, 회절격자 효율이 높은 Littrow 각도를 고려하면서 회절된 빔이 일직선으로 퍼질 수 있도록 각도를 조절한 결과 입사각이 47° 였으며, Concave mirror와 회절격자 간의 거리를 변화시켜 가며 펄스 폭을 측정하였다. 먼저 설계를 통해 각각의 거리에 따른 펄스 확장기에 대한 데이터를 얻은 후, 회절 격자간의 거리가 10 cm 일 때, 설계치는 16.1 ps 정도로 입력 펄스에 비해 169배 확장되었으며, 측정치는 18.02 ps 로 189배 확장되었다. 마찬가지로 거리를 더 늘려 20 cm 로 제작했을 때, 설계치는 32.5 ps 였고, 입력 펄스에 비해 342배 되었으며, 측정치는 34.8 ps 로 366배 확장되었다. 회절 격자 간격이 30 cm 인 경우에는 설계치는 52.4 ps 이고, 측정치는 53.3 ps 로 확장됨을 알 수 있었다. 이에 대한 내용을 간단하게 정리한 것이 표 4.5이다.

	거리		
	10 cm	20 cm	30 cm
각도	47°	47°	47°
설계치	16.1 ps	32.5 ps	50.2 ps
측정치	18.02 ps	34.8 ps	53.2 ps

표 4-5 Concave mirror와 회절격자 간의 거리 변화에 따른 펄스 폭 확장 변화표 (입력펄스-95 fs).

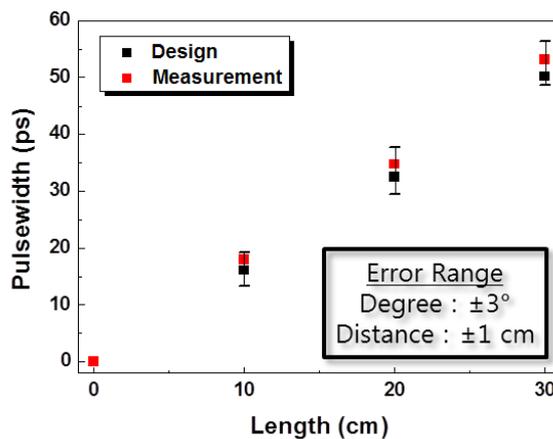


그림 4.15 설계치와 측정치 비교 분석.

설계치와 측정치의 값을 그림 4.15를 통해 비교해보면 측정치가 설계치 안에 들어오는 최적화된 펄스 확장기를 제작하였다. 오차범위를 $\pm 3^\circ$, 1 cm 를 준 이유는 광학 계가 많이 사용되며, Concave mirror와 Convex mirror 가 대면적이기 때문에 미세하게 조절하기 어렵기 때문이다. 그리고, OSA를 사용하여 펄스의 스펙트럼을 측정한 결과, 회절격자와 Concave mirror의 거리 변화에 따른 스펙트럼에 대해 그림 4.16으로 데이터화한 결과, 펄스 폭을 확장하여도 스펙트럼이 안정적이었다.

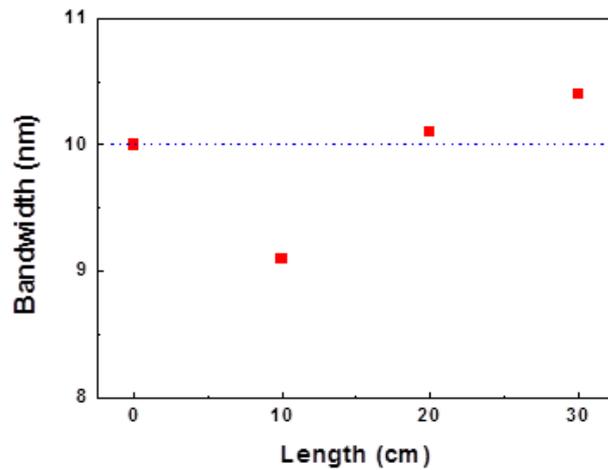


그림 4.16 확장된 펄스의 스펙트럼.

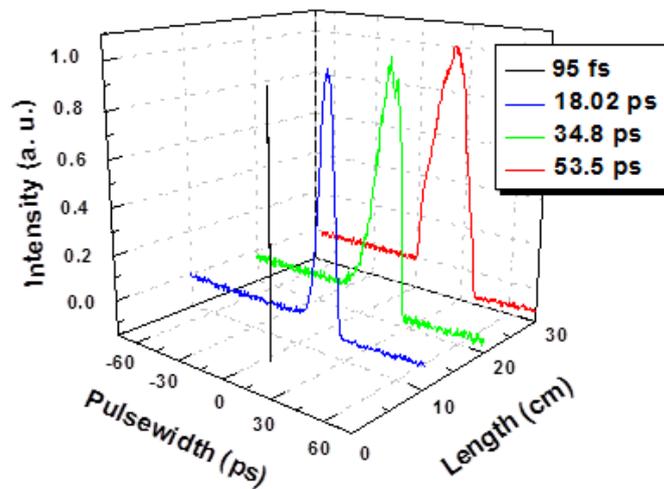


그림 4.17 3D image로 보는 47° , 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭.

47°에서 회절격자와 Concave mirror 간의 거리 변화에 따라 펄스 폭의 확장되는 것을 한눈에 보기 위해 그림 4.17처럼 3D 이미지로 처리하여 펄스 폭이 거리에 따라 확장되는 모습을 확인하였다. 결과적으로 스펙트럼의 변화가 없고, 설계치와 측정치의 오차가 적은 최적화된 양분산형 펄스 확장기를 제작하였음을 알 수 있었다. 하지만 1200 groove 를 사용한 회절격자의 효율이 80% 미만이기 때문에 회절격자의 효율이 90% 이상인 1700 groove 를 이용하여 펄스 확장기를 설계하고 제작하였다.

회절격자 수가 1700 groove인 경우, 회절격자의 효율이 높은 Littrow 각도를 고려하여 근처의 각인 입사각이 75°로 설정하였으며, Concave mirror와 회절격자 간의 거리를 변화시켜 가며 펄스 폭을 측정하였다. 먼저 설계를 통해 각각의 거리에 따른 펄스 확장기에 대한 데이터를 얻은 후, 회절 격자간의 거리가 2.5 cm 일 때, 설계치는 26.4 ps 정도로 입력 펄스에 비해 277배 확장되었으며, 측정치는 26.6 ps 로 280배 확장되었다. 마찬가지로 거리를 더 늘려 5 cm 로 제작했을 때, 설계치는 46.3 ps 였고, 입력 펄스에 비해 487배 되었으며, 측정치는 49.7 ps 로 523배 확장되었다. 회절 격자 간격이 7.5 cm 인 경우에는 설계치는 63.5 ps 이고, 측정치는 64.3 ps 로 확장됨을 알 수 있었다. 이에 대한 내용을 간단하게 정리한 것이 표 4.6이다.

	거리		
	2.5 cm	5 cm	7.5 cm
각도	75°	75°	75°
설계치	26.4 ps	46.3 ps	63.5 ps
측정치	26.6 ps	49.7 ps	64.3 ps

표 4-6 Concave mirror와 회절격자 간의 거리 변화에 따른 펄스 폭 확장 변화 표(입력펄스-95 fs).

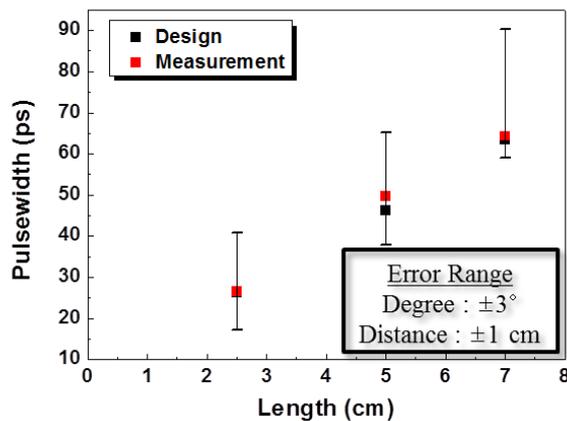


그림 4.18 설계치와 측정치 비교 분석.

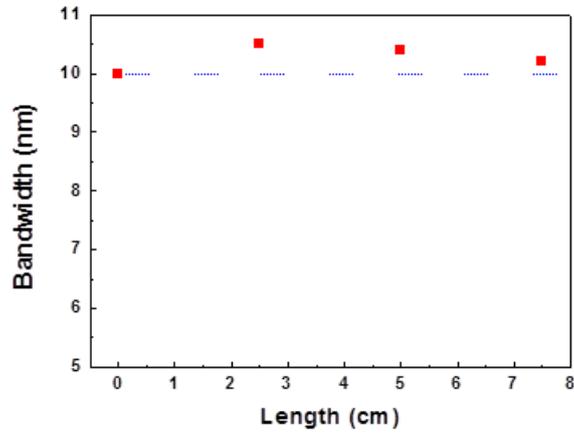


그림 4.19 확장된 펄스의 스펙트럼.

설계치와 측정치의 값을 그림 4.18를 통해 비교해보면 측정치가 설계치 안에 들어오는 최적화된 펄스 확장기를 제작하였다. 오차범위를 $\pm 3^\circ$, 1 cm 를 준 이유는 광학계가 많이 사용되며, Concave mirror와 Convex mirror 가 대면적이기 때문에 미세하게 조절하기 어렵기 때문이다. 그리고, OSA를 사용하여 펄스의 스펙트럼을 측정한 결과, 회절격자와 Concave mirror의 거리 변화에 따른 스펙트럼에 대해 그림 4.19로 데이터화한 결과, 펄스 폭을 확장하여도 스펙트럼이 안정적이었다.

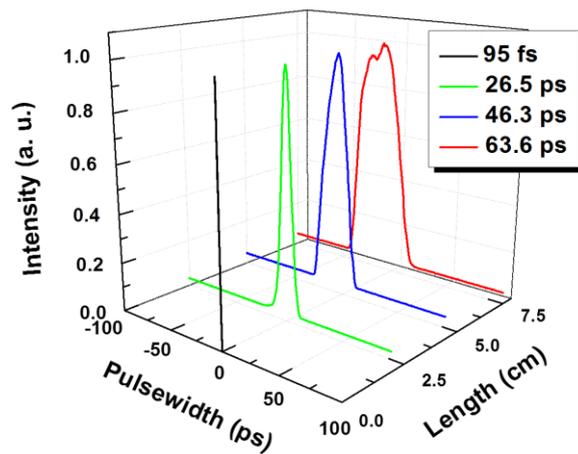


그림 4.20 3D image로 보는 75° , 거리 변화에 따른 확장된 펄스 폭.

75°에서 회절격자와 Concave mirror 간의 거리 변화에 따라 펄스 폭의 확장되는 것을 한눈에 보기 위해 그림 4.20처럼 3D 이미지로 처리하여 펄스 폭이 거리에 따라 확장되는 모습을 확인하였다. 결과적으로 스펙트럼의 변화가 없고, 설계치와 측정치의 오차가 적은 최적화된 Öffner-Type 펄스 확장기를 제작하였음을 알 수 있었다. 펄스 확장기 통과 후 입력 펄스의 파워가 반 밖에 줄지 않는 최적의 확장기를 제작하였다.

제 4.4 절 Ytterbium을 사용한 광섬유 증폭기 제작 및 특성 분석

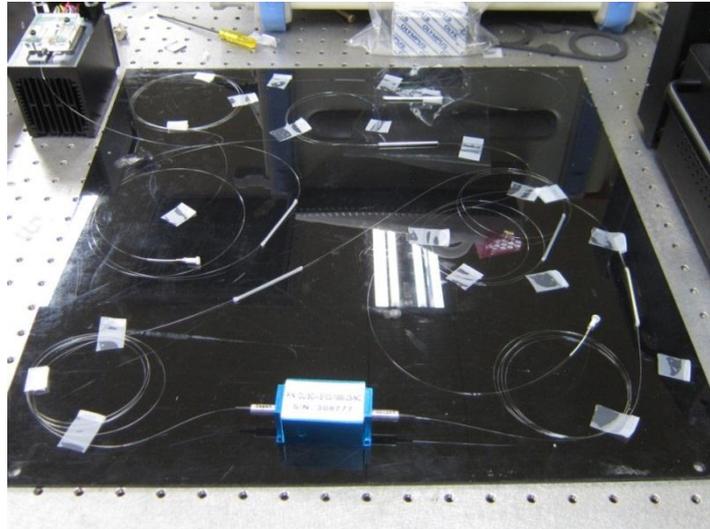


그림 4.21 1030 nm 용 확장된 펄스의 출력을 보상하는 1차 증폭기.

펄스 확장기를 통해 펄스 폭을 확장하고, 그 다음 확장된 펄스를 펄스 증폭기를 통해 증폭하려고 한다. 2장에 설명한대로 고출력의 증폭된 펄스를 얻기 위해 Ytterbium이 도핑된 광섬유를 사용하여 광섬유 펄스 증폭기를 구성할 수 있다. 그림 4.21처럼 1030 nm 용 광섬유 펄스 1차 증폭기는 펌프 LD를 보호하기 위한 아이솔레이터(Isolator), 펌프 LD, WDM Coupler, 그리고 이득매질로 사용하는 Ytterbium doped fiber로 구성하기 위해 스플라이싱(Splicing) 처리를 하여 광섬유 간에 연결을 하였다 이 증폭기의 구성도는 그림 4.22와 같다.

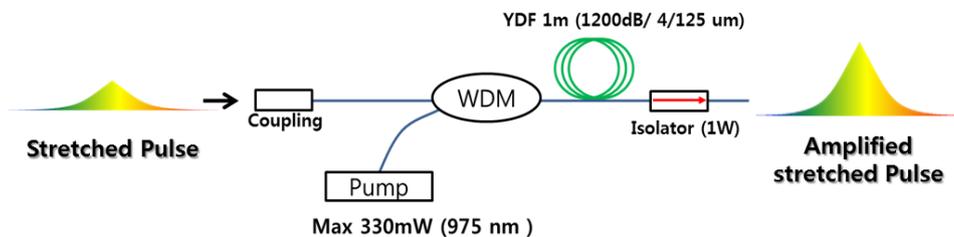


그림 4.22 1차 증폭기 구성도.

스플라이싱 시 필요한 조건들은 단일모드 광섬유이기 때문에 제품의 AUTO 모드로 진행하여, 융합한 결과, 광섬유 간의 결합으로 인한 손실은 0.01 dBm 이다. 증폭 매질 광섬유에 넣기 전에 펌프 LD 의 전류에 따라 제품의 사양과 같은 특성이 나오는지 를 그림 4.23을 통해 측정하였다.

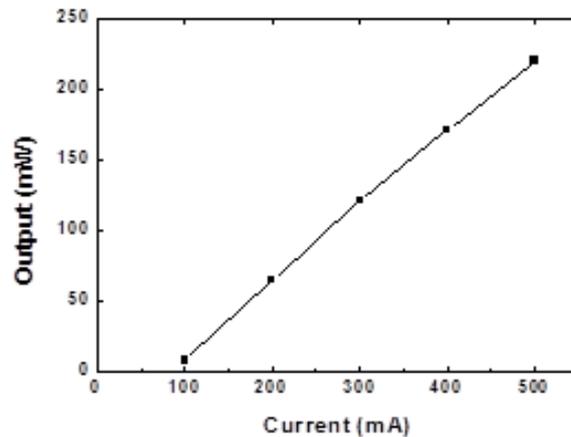


그림 4.23 Current에 따른 펌프 LD의 증폭률.

다음은 앞서 제작하였던 Öffner-Type 펄스 확장기를 통과하여 확장된 펄스를 얻은 75°, 7.5 cm 일 때 펄스 폭이 64.3 ps 인 펄스를 가지고 증폭기를 실험하였다. 이 확장한 펄스를 가지고 증폭기의 입력 펄스로 사용하여 펌프 LD의 파워가 증폭기에 들어가지 않을 때, 펄스 확장기 통과 후의 파워를 바꿔가면서 Fiber loss 에 대해 측정 한 결과가 그림 4.24이다.

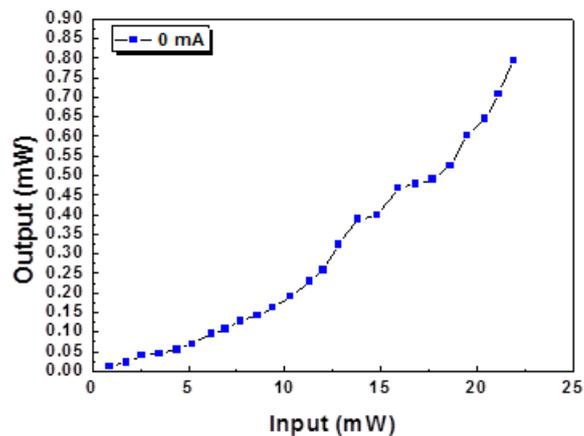


그림 4.24 Fiber Loss(YDF).

그림 4.25는 펄스 확장기 통과 후 나오는 파워를 조절하면서 Pump LD의 Current 변화에 따른 결과를 얻었다.

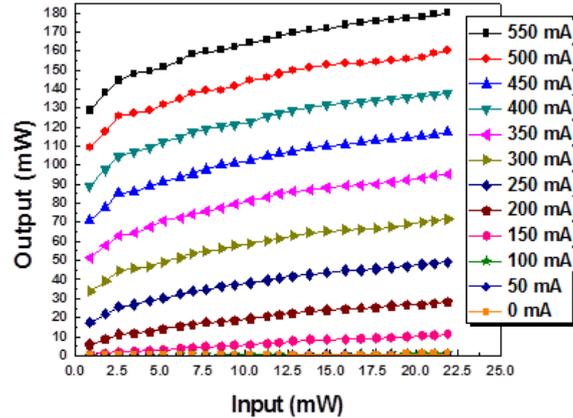


그림 4.25 펄스 증폭기의 증폭 특성.

펄스 레이저의 파워가 250 mW 일 때, 펄스 확장기 통과 후의 출력은 126 mW 이며, 펄스를 fiber로 집속시킨 후의 출력은 22.5 mW 로 증폭기에 넣었을 때 펌프 LD의 Current가 550 mA 에서 증폭된 출력이 180 mW 였다. 이 증폭기의 Gain 은 8.1 이였고, 그림 4.25는 증폭되고 확장된 펄스의 스펙트럼을 측정한 결과이다. 광섬유의 특성 상 증폭하게 되면서 펄스의 스펙트럼이 약간 줄어들었다.

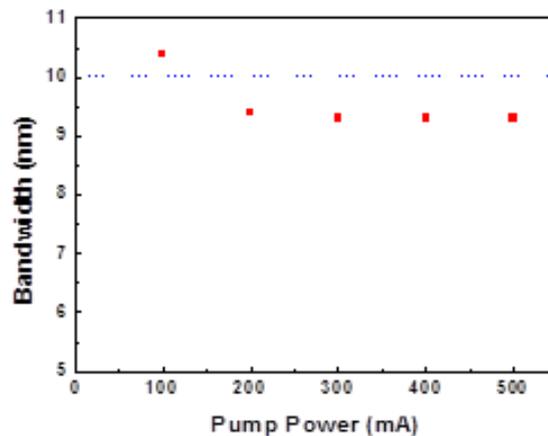


그림 4.26 펌프 LD의 Current 변화에 따른 펄스의 스펙트럼 변화 측정.

제 5 장 결론

CPA 기술 중 첫 번째 단계인 펄스 확장기를 음분산형과 양분산형으로 설계하고 제작하였다. 먼저 음분산형인 Treacy-Type 펄스 확장기는 이론에 입각한 설계를 통하여 펄스 폭의 확장 정도를 예측할 수 있고, 실제 설계 조건과 동일하게 펄스 확장기를 제작한 결과, 입사각이 50° 이고, 회절격자 간의 거리가 70 cm 일 때, 53.3 ps 로 설계치와 측정치가 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 40° 와 50° 의 펄스 확장기를 제작하면서 회절 격자 간의 거리의 변화보다 입사각의 변화가 펄스 폭 확장에서 더 중요한 변수임을 알 수 있었다. 입사각 40° 에서의 펄스 확장기가 펄스 확장 효율이 더 높았지만, 회절격자 간의 거리에 따른 펄스의 스펙트럼의 변동이 없는 입사각 50° 에서의 펄스 확장기가 더 안정적인 펄스 확장기임을 알 수 있었다. 또한 양분산형인 Martinez-Type 펄스 확장기를 설계하고 제작하여 입사각이 50° 이고, 회절격자 간의 거리가 50 cm 일 때, 42.3 ps 로 설계치와 측정치가 일치하는 것을 확인할 수 있었다. Treacy-Type 펄스 확장기와 마찬가지로 40° 와 50° 의 펄스 확장기를 제작하면서 회절 격자 간의 거리의 변화보다 입사각의 변화가 펄스 폭 확장에서 더 중요한 변수임을 알 수 있었다. 하지만 입사각 40° 와 입사각 50° 에서의 펄스 확장기가 회절격자와 렌즈 사이의 거리가 가까워질수록 렌즈의 구경한계로 인해 빔의 잘림현상으로 펄스의 스펙트럼 감소가 일어나게 되었다. 그래서, 대구경 반사경을 사용한 Öffner-Type 펄스 확장기를 설계하고 제작하여 렌즈에서 발생하는 수차를 최소화시키며, 펄스의 스펙트럼 감소가 없고, 펄스 확장기의 출력을 높이기 위해 회절 효율이 90% 이상이 되는 것을 사용하여 펄스 확장기의 출력 효율을 증가시켰다. 그리고 Ytterbium을 이용한 광섬유 증폭기를 제작하여 특성을 본 결과, Gain이 8.1 정도임을 확인하였다. 향후 펄스 확장기 통과 후 빔을 광섬유로 집속 시킬 때 발생하는 손실을 줄여서 현재 구성된 시스템의 입력 대 출력 비율을 높일 것이다.

또한 CPA 시스템을 설계한 데이터를 토대로 2차 증폭기와 펄스 압축기 제작을 통해 출력이 3W 이며, 압축된 펄스 폭이 수백 fs 인 CPA 시스템의 구축을 완성할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulse" , Opt. Commun. 55, 447 (1985).
- [2] C. V. Shank and E. P. Ippen, "Subpicosecond kilowatt pulses from a mode-locked CW dye laser" , Appl. Phys. Lett. 24, 373 (1974).
- [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. 39, 617 (1981).
- [4] J. A. Valdmanis, R. L. Fork, and J. P. Gordon, " Generation of optical pulses as short as 27 femtoseconds directly from a laser balancing self-phase modulation, group-velocity dispersion, saturable absorption, and saturable gain" , Opt. Lett. 10, 131 (1985).
- [5] R. L. Fork, C. H. B. Cruz, and C. V. Shank, "Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation" , Opt. Lett. 12, 483 (1987).
- [6] P. Moulton, " Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃" , J. Opt. Soc. Am. B 3, 125 (1985).
- [7] D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser" , Opt. Lett. 16, 42 (1991).
- [8] T. F. Carruthers, I. N. Duling III, M. Horowitz, and C. R. Menyuk, "Dispersion management in a harmonically mode-locked fiber soliton laser" , Opt. Lett. 25, 153 (2000).
- [9] M. E. Fermann, "Ultrafast fiber oscillators" , in Ultrafast Lasers: Technology and Applications (eds. M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha), Chapter 3, pp. 89-154, Marcel Dekker, New York (2003).
- [10] Cumpston, B. H., Ananthavel, S. P., Barlow, S., Dyer, D. L., Ehrlich, J. E., Erskine, L.L., Heikal, A. A., Kuebler, S. M., Lee, I.-Y. S., McCord-Maughon, D., Qin, J., Rockel, H., Rumi, M., Wu, X.-L., Marder, S. R. and Perry, J. W., "Two-photon polymerization initiators for three-dimensional

- optical data storage and microfabrication” , Nature, 398, 51 (1999).
- [11] Saleh, B. E. A. and Teich, M. C.,” Fundamentals of Photonics” , Wiley, pp. 522-525 (1997).
- [12] Young-jin Kim, Yunseok Kim, Seungman Kim and Seung-Woo Kim, “Ultrafast Femtosecond Lasers: Fundamentals and Applications” , Journal of the Korean society for precision engineering 27, 6 (2010)
- [13] Igor. Jovanovic,” Chirped-Pulse Amplification: Ultrahigh peak power production from compact short-pulse laser systems” , Optik & Photonik Tutorial 4, 30 (2010).
- [14] Eugene. Hecht, Optics 4th edition, pp. 358-363, Addison Wesley Longman, Inc. (2002).
- [15] 윤창준, “Design and Characteristics of a broadband Cr:forsterite Optical Parametric Chirped Pulse Amplifier at kHz repetition rates” , 아주대학교 석사학위 논문 (2006).
- [16] Thorlabs. catalog. 21. pp.874~878.
- [17] Newport, diffraction grating handbook chapter2 ‘THE PHYSICS OF DIFFRACTION GRATINGS’ .
- [18] D.strickland and G.mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses” , Optics.Comm. 56. 447 (1985).
- [19] C. Fiorini, C.Sauteret, C. Rouyer, N. Blanchot, S. Seznec, and A. Migus, “Temporal Aberrations Due to Misalignments of a Stretcher-Compressor System and Compensation” , IEEE. J.Quantum Electron. 30. 7 (1994).
- [20] E. B. Treacy, “Optical Pulse Compression with Diffraction Grating” , IEEE J.Quantum Electron QE-5, 454 (1969).
- [21] O. E. Martinez. “Grating and prism compressors in the case of finite beam size” , J. Opt. Soc. Amer. B. 3, 7 (1986).
- [22] O. E. Martinez, “Design of High-power Ultrashort Pulse Amplifiers by Expansion and Recompression” ,IEEE. J. Quantum Elec. 23. 8. 1385 (1987).
- [23] O. E. Martinez, “3000 Times Grating Compressor with Positive Group Velocity Dispersion: Application to Fiber Compensation in 1.3-1.6 um Region” , IEEE. J. Quantum Elec. 23, 59 (1987).

- [24] M. Pessot, P. MAINE and G. Mourou, "1000 Times Expansion/Compression of Optical Pulses for Chirped Pulse Amplification", *J. Opt. Soc. Amer. B.* 62, 6 (1987).
- [25] Jeff Squire, Charles Duffee III, Thomas Planchon, "Chirped Pulse Amplification" Department of physics, Colorado school of Mines, USA..
- [26] G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin, and J. P. Chambaret, "Aberration-free stretcher desing for ultrashort-pulse amplification", *Opt. Lett.*, 21, 6 (1996).
- [27] Qingwei Yang, Ailin Guo, Xinglong Xie, Fuling Zhang, Meizhi Sun, Qi Gao, Meirong Li, Zunqi Lin, "Stretcher Design for the SGI Petawatt Upgrade Laser Facility" *The Review of Laser Engineering Supplemental.* 2008 (2008).
- [28] Jie Jiang, Zhigang Zhang, Toshifumi Hasama, "Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Offner triplet telescope stretchers", *J. Opt. Soc. Am. B.* 19, 4 (2002).
- [29] A. Tunnermann, T. Schreiber, F. Roser, A. Liem, S. Hofer, H. Zellmer, S. Nolte and J. Limpert, "The renaissance and bright future of fibre lasers", *Journal of Physics B* 38, 681 (2005).
- [30] W. A. Clarkson, L. J. Cooper, P. Wang, R. B. Williams and J. K. Sahu, "Power scaling concepts for fiber lasers", *Trends in Optics and Photonics*, 83, 261 (2003).
- [31] A. Liu and K. Ueda, "The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers", *Optics. Communications* 132, 511 (1996).
- [32] H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber, J. M. Dawes, "Ytterbium doped silica fiber laser: versatile sources for the 1.0-1.2 um Region", *IEEE J. Electron* 28, 1 (1995).
- [33] H. W. Etzel, H. W. Candy. And R. J. Ginther, "Stimulated emission of infrared radiation from ytterbium-activated silicate glass", *Appl. Opt* 1, 534 (1962).
- [34] FR-103XL AUTOCORRELATOR INSTRUCTION MANUAL, Femtocrome Inc.
- [35] E. P. Ippen and C. V. Shank, S. L. Shapiroed, in *Ultrashort Light Pulses*, New York, Springer-Verlag (1997).

- [36] H.TAKADA, M.KAKEHATA, K.TORIZUK, “Large-ratio stretch and recompression of sub-10-fs pulse utilizing dispersion managed devices and a spatial light modulator” , Appl. Phys. B 74. 253 (2002).

ABSTRACT

A study of Chirped Pulse Amplification system for developing specific heat sub-micron femtosecond laser

Hwang, Jung Min

M.S. In Dept. of Electrical and Electronic Engineering

The Graduate School

Yonsei University

Although ultra-short (below picosecond) laser have only a little energy, use of the laser with high peak power has increased for ultra-micro machining in the Micro Industry. As expanding Industry part, the laser system for ultra-micro machining is required much high peak power. Chirped pulse amplification (CPA) is the only way to amplify ultra-short pulse. So, the technique has been applied a lot of femtosecond laser systems. Principle of the CPA is that pulsewidth of ultra-short pulses of the laser is stretching from the pulsewidth a hundreds of times to a hundred thousands of times without damaging a gain medium. The more pulsewidth of the laser is stretched, the more peak power of the laser is decreased, relatively. So, amplifying stretched pulse of the laser can avoid non-linear phenomena during amplifying the laser. In other words, it can amplify efficiently. By compressing pulsewidth of the laser, it is how to get ultrahigh power ultra-short pulses with the peak power of more than 100 TW.

In this paper, the first step of CPA is a way to stretch the pulsewidth with ultra-short pulses though a Pulse Stretcher. The pulse stretcher can produce structure of two methods. One is causing strong positive dispersion effects to compensate negative dispersion through positive dispersion type pulse

stretchers. In turn, two is strong negative dispersion effects to compensate positive dispersion through negative dispersion type pulse stretchers. So the two types of pulse stretcher were designed and produced, respectively.

The negative dispersion type pulse stretcher was designed and built by using Ti: sapphire laser with pulsewidth of 100 fs and wavelength of 1030 nm. After, Laser beam is entered incident angle of 40° and 50° on a Diffraction Grating. Then, distance of between the grating is changed at 10, 30, 50 cm as fixed the grating state. Pulse stretcher with the structure of two angles were designed and produced, respectively. When incidence angle of the first diffraction grating is 40° , after producing pulse stretcher according to changing distance of between the grating, data gained as a 50° . In addition, positive dispersion type pulse stretcher by using Ti: sapphire laser like negative type pulse stretcher designed and manufactured. Next to Incident beam is fixed incidence angle of 40° and 50° at the grating, as changing the distance between the grating and lens at 10, 30, 50 cm. respectively. Then, pulse stretcher designed changing pulsewidth according to change distance between the grating and a lens. Also, pulse stretcher of new structure was designed and built for compensating a reduction of the spectrum of stretched pulse about produced positive dispersion type pulse stretcher. The second step of CPA is technique that a way to amplify stretched pulse by using a crystal or optical fiber as gain medium. Pulse amplifier with Double Cladding fiber, LMA (Large Mode Area), ytterbium-doped fiber has designed to reduce peak power of laser that high peak intensity occurring non-linear effect or damage in the fiber. And, with amplifying stretched pulse, output of pulse due to characteristic of the grating is reduced. So, ytterbium-doped fiber 1th amplifier was constructed to compensate it. The final step of CPA is pulse compressor that by using the grating pair was designed to compress amplified stretched pulse.

Keyword: Chirped pulse amplification, Ti:sapphire, Ultrashort pulse, Pulse stretcher, Pulse compressor, Ytterbium doped fiber, Large mode area, Group delay dispersion, Diffraction grating, Diffraction angle