

• Topical Issue • 레이저를 이용한 가공 기술(Laser Processing Technologies)

# 광 스펙트럼 성형을 통한 GHz 반복률 전광 주파수 빔 기반 레이저의 펄스 품질 개선

## Spectral Shaping for Pulse Quality Improvement in GHz-repetition-rate Electro-optic Comb Lasers

성준영<sup>1,2</sup>, 김영규<sup>1</sup>, 김병주<sup>1</sup>, 최지연<sup>1,2</sup>, 안상훈<sup>1,2</sup>, 임건<sup>1</sup>, 손현기<sup>1</sup>, 김도현<sup>1,2,#</sup>

Junyeong Sung<sup>1,2</sup>, Yeong Gyu Kim<sup>1</sup>, Byungjoo Kim<sup>1,2</sup>, Jiyeon Choi<sup>1,2</sup>, Sanghoon Ahn<sup>1,2</sup>, Geon Lim<sup>1</sup>, Hyonkee Sohn<sup>1</sup>, and Dohyun Kim<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 광응용장비연구소 (Department of Laser & Electron Beam Technologies, Korea Institute of Machinery & Materials)

<sup>2</sup> 과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템(로봇-제조장비)전공 (Department of Mechanical Engineering(Robot-Manufacturing Systems), University of Science and Technology)

# Corresponding Author / E-mail: kimdohyun19@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7031

ORCID: 0009-0009-6125-5406

KEYWORDS: GHz repetition rate (GHz 반복률), Electro-optic frequency comb (전광 주파수 빔), Spectral shaping (스펙트럼 성형), Pulse characteristic (펄스 특성)

*Lasers are widely used in precision metrology, defense, and micromachining. The rise of GHz burst processing has increased interest in high-repetition-rate laser sources. Electro-optic (EO) frequency combs are promising due to their excellent controllability and GHz-range tunability. However, the modulation process that generates EO combs produces M-shaped spectra with pronounced side peaks containing high-order chirped components. These can degrade amplification efficiency and limit pulse distribution quality due to incomplete temporal compression. In this study, we implemented a 24-W EO comb-based picosecond laser system and applied programmable spectral shaping with a 0.7-nm Gaussian-filter to suppress spectral side peaks. As a result, temporal energy confinement of compressed pulse was significantly improved from 53.1 to 92.8% while maintaining comparable output power and pulse duration. These findings demonstrate that spectral shaping can effectively enhance the temporal quality of EO comb pulses, supporting their application in high-precision GHz-burst micromachining.*

Manuscript received: April 11, 2025 / Accepted: June 9, 2025

### 1. 서론

레이저 기술은 정밀 계측, 방위 산업, 광통신, 재료 가공 등 다양한 분야에서 핵심적으로 활용되고 있다. 특히 가공 분야에서는 절단, 용접과 같은 거시적 가공부터 패터닝, 그루빙 등 정밀 가공에 이르기까지 다양한 응용이 이루어지고 있다. 이 중 펄스 레이저는 높은 펄스 에너지와 첨두 출력으로 인해 재료에 전달되는 열 영향을 최소화할 수 있으며, 다광자 흡수를 유도함으로써 유리와 같은 투명 매질에 대해서도 정밀 가공이 가능하다는 장점을 가진다[1-4].

펄스 레이저 기반 정밀 가공 기술은 특히 최근 제조 장비의 소형화 및 고정밀화 흐름에 따라 그 중요성이 더욱 부각되고 있다. 일반적으로 펄스 폭이 짧을수록 높은 에너지 밀도를 제공하여 뛰어난 가공 품질을 확보할 수 있지만, 이로 인해 낮은 평균 출력과 함께 생산성이 저하되는 한계를 갖는다[5]. 이러한 한계를 극복하기 위해 고출력 펄스 레이저 개발[6-8], 극초단 펄스 압축 기술[9-11] 등의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 GHz 반복률의 버스트(Burst) 펄스를 활용하여 단일 펄스 대비 열 손상을 줄이면서도 어블레이션(Ablation) 볼륨 속도를 향상시킬 수 있다는 연구가 보고되고 있다[12]. 이 방식은 물질의

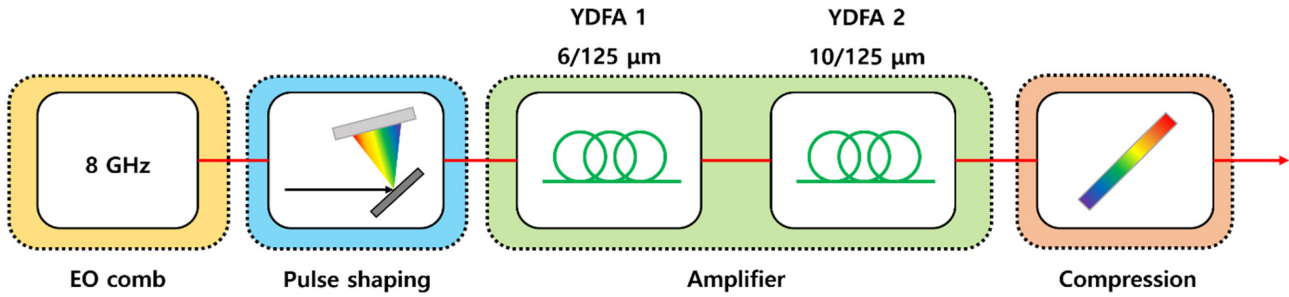


Fig. 1 Experimental setup of the EO comb-based laser system

열 확산 시간보다 짧은 간격으로 다수의 펄스를 인가함으로써 열 손상을 최소화하고 가공 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 다만, 이러한 효과의 물리적 메커니즘 및 최적 조건에 대한 연구는 아직 진행 중이며, 절연체 및 금속 등 다양한 재료에 대한 파라미터 최적화가 필요하다.

GHz급 버스트 펄스 생성을 위해서는 고반복률의 펄스 버스트를 안정적으로 출력할 수 있는 광원이 필요하다. 현재까지 제안된 주요 구현 방식으로는 (1) 반복률 증배 방식[13,14], (2) 외부 루프(Extra-cavity Loop)를 활용한 방법[15], (3) 전광 주파수 빔(Electro-optic Frequency Comb, EO Comb)의 활용[16,17]이 있다. 기존 방식들은 주로 모드잠금 레이저 기반으로 우수한 펄스 품질과 안정성을 제공하지만, 반복률 선택에 제약이 존재한다. 반면 전광 주파수 빔 방식은 RF 구동 신호를 통해 반복률을 자유롭게 설정할 수 있어 GHz급 펄스 생성을 유연하게 구현할 수 있으며, 다양한 재료에 맞춘 가공 파라미터 조정이 중요한 정밀 가공 응용에 적합하다.

정밀 가공을 위한 레이저는 시간 영역에서의 펄스 품질 확보가 중요하다. 전광 주파수 빔은 연속파 레이저에 위상 변조를 가하여 스펙트럼을 확장하는 방식으로 동작하며, 이때 사인파 형태의 위상 변조에 의해 생성되는 펄스는 주변부(Pedestal)에 고차 위상이 포함되어 펄스 압축 품질에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 주변부는 정밀 가공 시 불필요한 열 전달을 유발하거나 가공 성능을 저해하는 요인이 될 수 있다. 따라서 펄스 품질 향상을 위해 주변부 위상의 제어 또는 억제 필요하다.

본 연구에서는 전광 주파수 빔 기반 레이저의 내재된 처프 펄스(Chirped Pulse) 특성을 활용하여, 광 스펙트럼에 가우시안 형태의 성형을 적용함으로써 중심 펄스 에너지의 집중도를 향상시키고 주변부 잡음을 억제하는 방식을 제안하였다. 기존 연구들이 주로 주파수 성분의 활용 관점에서 전광 주파수 빔의 스펙트럼 평탄화(Flat-top Shaping)[18,19]에 집중한 데 반해, 본 연구는 정밀 가공 응용을 위한 시간 영역 펄스 품질 최적화에 중점을 두어 스펙트럼 성형을 수행하였다는 점에서 차별성을 가진다.

이를 위해 20W급 전광 주파수 빔 기반 레이저를 제작하고, 가우시안 형태의 스펙트럼 성형 적용 전후에 따른 펄스의 시간 및 주파수 영역 특성을 측정 및 분석하였다. 그 결과, 펄스 품질의

개선 가능성을 확인하였으며, 이는 향후 GHz 버스트 기반 정밀 가공 기술 개발에 있어 중요한 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 광 스펙트럼 성형이 전광 주파수 빔의 펄스 품질에 미치는 영향을 규명하기 위해, Fig. 1과 같이 약 25 W 출력을 갖는 전광 주파수 빔 기반의 고출력 펄스 레이저 시스템을 구성하고 실험을 수행하였다. 실험은 전광 주파수 빔의 생성, 증폭 및 압축 시스템 구성, 그리고 광 스펙트럼 성형 실험의 세 단계로 나누어 진행되었다.

### 2.1 전광 주파수 빔의 생성 원리

전광 주파수 빔은 단일 주파수의 연속파 레이저를 고속 전광 변조기(Electro-optic Modulator)를 통해 변조함으로써 서로 일정한 간격을 가지는 주파수 성분, 즉 ‘빔(Comb)’ 형태의 스펙트럼을 생성하는 기술이다[20]. 이러한 주파수 성분들 간 시간 지연에 따라 시간 영역에서 처프 펄스가 형성되며, 이후 압축기를 통해 피코초 또는 펨토초 수준의 짧은 펄스로 변환될 수 있다[21].

본 연구에서는 전광 주파수 빔 생성을 위해 하나의 전광 세기 변조기(Intensity Modulator, IM)와 두 개의 전광 위상 변조기(Phase Modulator, PM)를 직렬로 연결한 구성으로 시스템을 구현하였다. 사용된 광원은 중심 파장 1030 nm의 연속파 DFB(Distributed Feedback) 레이저 다이오드이며, 각 변조기는 8 GHz의 RF 신호로 구동하였다. 연속파 신호는 세기 변조기를 통과하며 진폭이 변조되고 이후 위상 변조기에서 강한 위상 변조를 겪으며 자기 위상 변조(Self-phase Modulation, SPM) 현상을 통해 광 스펙트럼을 확장하게 된다. 최종적으로 본 연구에서 제작된 전광 주파수 빔은 8 GHz의 반복률과 약 60 ps의 펄스폭, 약 3 mW 출력을 갖는다. 전광 주파수 빔 방식은 고속 반복률과 낮은 위상 잡음 특성을 가져 고출력 레이저 시스템과의 결합에도 유리하며, 중심파장 및 반복률의 선택이 상대적으로 자유로운 장점이 있다.

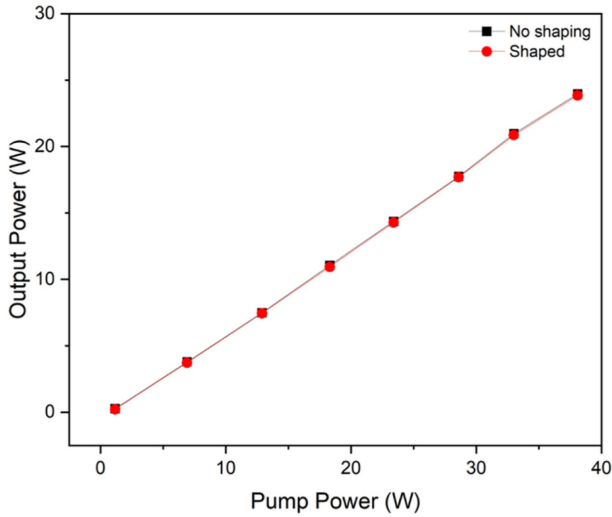


Fig. 2 Output power scaling of the main Yb-doped fiber amplifier (YDFA2)

2.2 증폭 및 압축 시스템 구성

생성된 전광 주파수 빔은 두 단계의 이터븀 도핑 광섬유 증폭기(Ytterbium-doped Fiber Amplifier, YDFA)를 통해 최대 24 W 수준까지 증폭되었다. 증폭기 구간에서 자발 방출광의 증폭(Amplified Spontaneous Emission, ASE)을 억제하고 펄스 품질을 유지하기 위해 두 증폭기 사이에 5 nm 대역폭의 밴드패스 필터(Bandpass Filter, BPF)를 삽입하였다.

전치 증폭기(YDFA1)는 코어 직경 6 μm의 단일 모드 광섬유를 사용한 코어 펌핑 방식으로 구성되었으며, 0.4 m 길이의 이득 광섬유를 사용하였다. 펌프 파워 600 mW 조건에서, 전치 증폭기 출력은 스펙트럼 성형을 적용하지 않은 경우 104 mW, 스펙트럼 성형을 적용한 경우 74.2 mW였다. 이후 주 증폭기(YDFA2)는 코어 직경 10 μm의 다중 모드 광섬유 기반의 더블-클래딩 펌핑 방식으로 구성되었으며, 2.8 m 길이의 이득 광섬유를 사용하였다. 출력은 펌프 파워에 따라 선형적으로 증가하였으며, 펌프 출력 38 W 조건에서 스펙트럼 성형하기 전/후 모두 최대 출력 24 W를 얻었다.

최종적으로 증폭된 신호는 1,800 l/mm의 투과형 회절 격자 한 쌍으로 구성된 펄스 압축기를 통해 약 3 ps 수준까지 압축되었다. 압축기의 분산 보상량은 모든 실험에서 고정된 상태를 유지하였다.

2.3 광 스펙트럼 성형 실험 구성

광 스펙트럼 성형 실험은 프로그래밍 가능한 스펙트럼 성형기(Waveshaper 1000A, Coherent)를 활용하여 수행하였다. 사용한 스펙트럼 성형기는 <2 nm의 좁은 광 대역폭 신호도 4 pm (1 GHz)의 높은 분해능으로 원하는 형상으로 스펙트럼 성형 제어가 가능하다. 목표 형상은 가우시안 형태로 1030.3 nm 중심파장, 0.7 nm 대역폭의 가우시안-필터를 적용하여 스펙트럼의

주변부 성분을 억제하도록 하였다. 장비 손상을 방지하기 위해 전광 주파수 빔과 전치 증폭기 사이에 배치하였으며, 입력 신호는 최대 5 mW 이내로 제한하였다. 필터 형태는 가우시안 형태로 고정하고, 그에 따른 출력 특성 및 펄스 품질 변화를 분석하였다.

스펙트럼 성형 전후에 따른 출력 측정은 전치 증폭기와 주 증폭기에서 진행되었으며, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 주 증폭기 구간에서는 출력이 포화되어 스펙트럼 성형 여부에 따른 출력 차이는 관찰되지 않았다. 광 스펙트럼과 펄스 특성 측정은 각각 전치 증폭기 이후와 펄스 압축기 이후에서 수행되었으며, 광 스펙트럼은 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer, OSA)를, 펄스 특성은 주파수 분해 광 게이팅(Frequency-resolved Optical Gating, FROG)을 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 전광 주파수 빔의 스펙트럼 성형

Fig. 3은 스펙트럼 성형 전후의 전광 주파수 빔 및 전치 증폭 단 이후의 광 스펙트럼 변화를 보여준다. 성형 이전의 전광 주파수 빔 신호(Fig. 3(a))는 3-dB 대역폭이 1.47 nm이며, 중심 파장을 기준으로 양측에 중심 대비 7.5 dB 높은 사이드 피크가 형성된 M자 형태의 스펙트럼을 나타낸다. 이는 자기 위상 변조를 통해 단일 주파수 성분에서 주변 스펙트럼이 생성되고 확장된 결과이다. 생성된 전광 주파수 빔 신호는 변조 과정에서 중심 파장에서 먼 주파수 성분일수록 변조 과정에서 처프(Chirp)가 선형적이지 않은 고차 처프를 갖게 된다. 따라서, 광 스펙트럼의 사이드 피크는 고차 처프가 중첩된 영역으로, 이후 반대 방향의 선형 분산을 이용한 펄스 압축기에서 완전히 압축되지 않아 펄스 품질을 저해하는 요인이 된다.

이를 개선하기 위해 스펙트럼 성형기에는 가우시안 필터를 적용하여 불필요한 사이드 피크 성분을 제거하였다. 중심 파장 1030.3 nm, 필터 대역폭 0.7 nm 조건에서 사이드 피크의 세기는 중심파장 대비 절반 이하로 억제되었으며, 이때 스펙트럼의 3-dB 대역폭은 약 0.81 nm로 감소하였다.

이후 전치 증폭기(YDFA1)를 통해 증폭된 결과는 Figs. 3(c)-3(d)에 제시되어 있다. 참고로, Figs. 3(c) 및 3(d)의 6 nm 폭의 스펙트럼 평탄 구간(Plateau)은 전치증폭기와 주 증폭기 사이의 대역폭 필터에 의한 영향이다. 스펙트럼 성형 전의 증폭된 신호는 3-dB 대역폭이 1.45 nm로 유사하지만, 중심파장 대비 사이드 피크의 세기 차이가 9.1 dB로 증가하여 신호잡음비가 악화되는 경향을 보였다. 반면, 스펙트럼 성형이 적용된 신호는 일부 사이드 피크 성분이 다소 증가하였으나 그 세기는 여전히 중심 파장의 약 1/2 수준이다. 그 과정에서 전체 3-dB 대역폭은 약 1.32 nm로 증가하였으나 여전히 주요 에너지는 중심파장 성분에 집중되어 있어, 펄스 품질 향상 측면에서 긍정적이다.

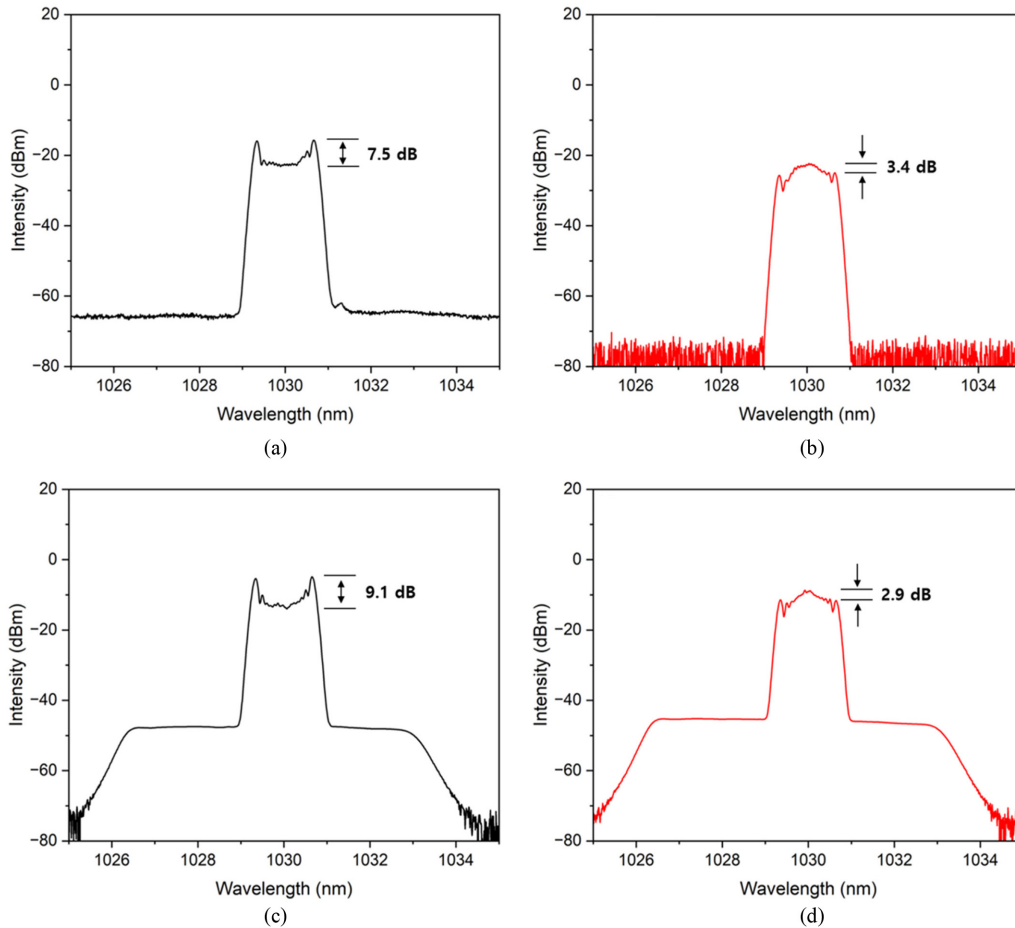


Fig. 3 Optical spectra of the EO comb at 8 GHz: (a) Unshaped spectrum before amplification, (b) Shaped spectrum before amplification, (c) Unshaped spectrum after YDFA 1, and (d) Shaped spectrum after YDFA 1

### 3.2 스펙트럼 성형에 따른 시간 영역에서의 펄스 특성

전치 증폭기 및 주 증폭기를 거친 신호는 1,800 l/mm 투과형 회절 격자 쌍으로 구성된 펄스 압축기를 통해 압축되었고, 이후 주파수 분해 광 게이팅 장비를 통해 시간-분광 특성이 측정되었다. 주 증폭기의 펌프 출력은 38 W로 설정하였으며, 이 조건 하에서 스펙트럼 성형 여부에 따른 시간 영역에서의 펄스 특성을 관찰하였다. Figs. 4(a) 및 4(b)는 스펙트럼 성형이 적용되지 않은 경우의 FROG 측정 및 복원 결과이며, Figs. 4(c) 및 4(d)는 스펙트럼 성형이 적용된 경우이다. 이미지의 가로축은 시간, 세로축은 주파수(또는 파장)를 나타내며, 측정된 데이터와 복원된 이미지 간의 G-error는 1% 이내로 정확한 복원이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

스펙트럼 성형 전 신호(Fig. 4(a))는 고차 처프의 영향으로 중심 파장에서 멀리 떨어진 성분일수록 시간 중심에서 멀리 위치하며, 전체적으로 부채꼴 형태의 분포를 보인다. 또한 중심파장 신호도 시간축 전반에 걸쳐 넓게 퍼져 있으며, 이는 중심 성분보다 강한 두 사이드 피크로 인해 생성된 서브-펄스들이 증폭 과정에서 서로 간섭하며 초래한 결과로 해석된다. 반면, 스펙트럼 성형이 적용된 경우(Fig. 4(c))는 시간축 중심에 에너지가

효과적으로 집중되어 펄스 밀집도가 향상된 양상을 보인다. 이는 불필요한 파장 성분을 사전에 제거함으로써 증폭기 내의 주 신호 증폭 효율이 증가하고, 결과적으로 펄스 품질이 개선되었음을 의미한다.

Fig. 5는 FROG 복원 데이터를 기반으로 계산된 펄스 프로파일과, 실측된 자기 상관(Intensity Autocorrelation) 결과를 비교하여 제시한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이, 스펙트럼 성형을 통해 펄스 주변부에 잔류하던 비압축 성분이 효과적으로 제거된 것이 관찰된다. 스펙트럼 성형을 수행한 이후에도 주 펄스의 FWHM (Full-width Half-maximum) 펄스폭은 3.3 ps로 동일한 값으로 측정되었다. 이 때, 복원된 이미지를 통해 예상한 최대 압축 펄스폭은 성형 전은 1.8 ps, 성형 후는 2.3 ps로 약간의 잔여 처프가 존재한다. 이는 회절 격자 쌍의 최적화 조정을 통해 추가 압축 가능할 것으로 기대된다.

펄스 에너지의 시간 중심부 밀집도는 성형 전 53.1%에서 성형 후 92.8%까지 향상되었으며, 이는 약 39.7%p의 개선을 의미한다. 특히 출력 손실 없이 이러한 밀도 향상이 이루어졌다는 점은, 스펙트럼 성형이 펄스 성능을 유지하면서도 에너지 활용도를 극대화할 수 있는 효과적인 수단임을 입증한다.

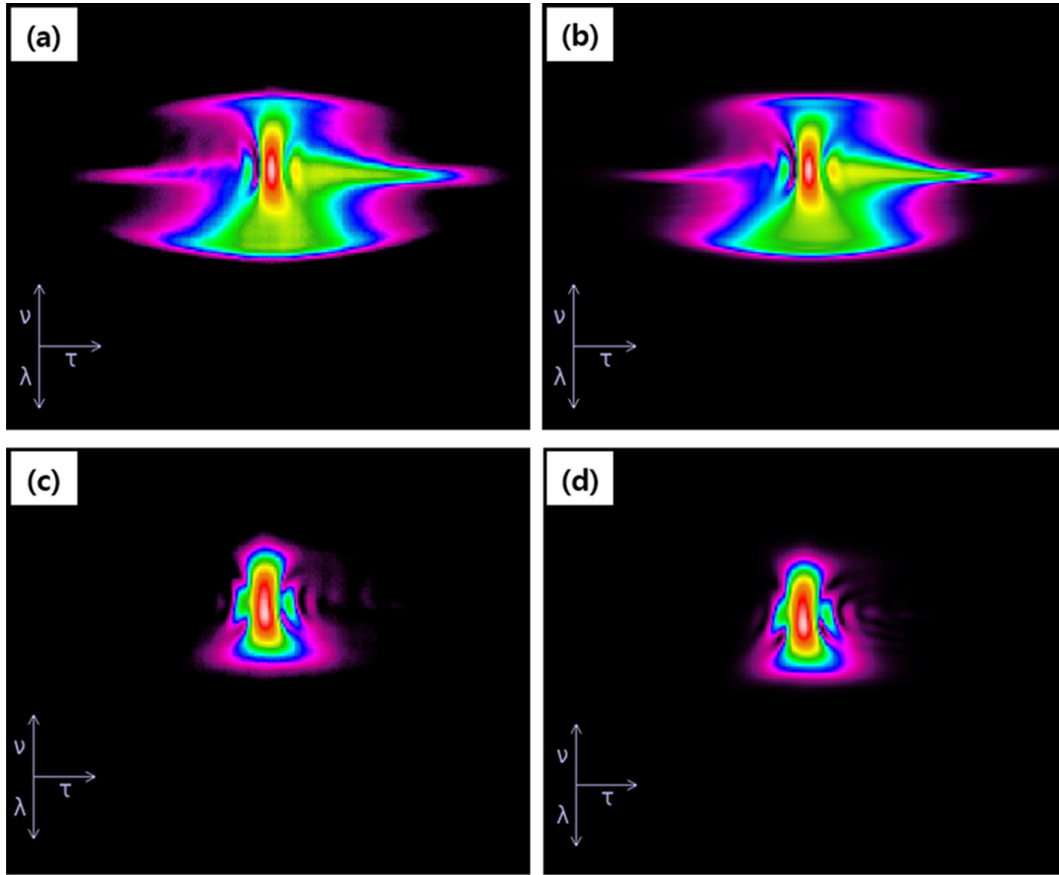


Fig. 4 FROG spectrograms of the EO comb at 8 GHz: (a) Measured spectrogram of the unshaped signal, (b) Retrieved spectrogram of the unshaped signal, (c) Measured spectrogram of the shaped signal, and (d) Retrieved spectrogram of the shaped signal

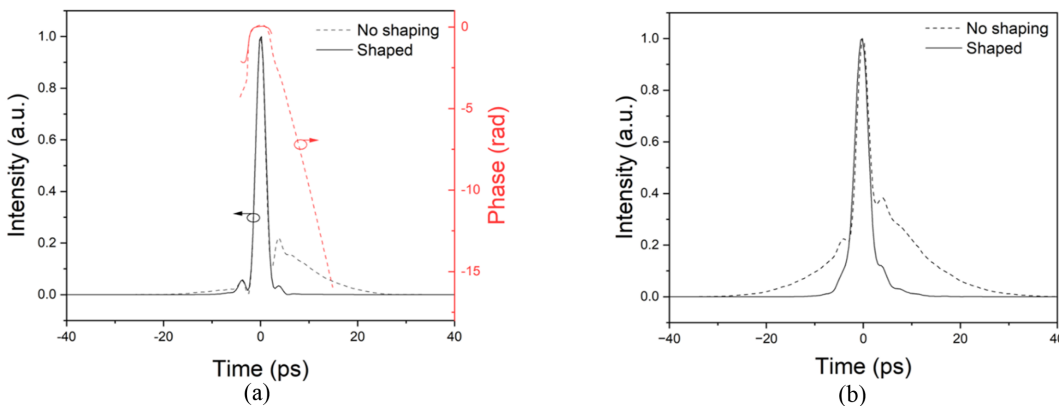


Fig. 5 (a) Retrieved temporal intensity profiles and (b) Measured autocorrelation traces before (dashed line) and after spectral shaping (solid line)

#### 4. 결론

본 연구에서는 GHz 고반복률의 전광 주파수 빔 기반 24 W 피코초 레이저 시스템에 스펙트럼 성형을 적용하고, 이에 따른 출력 특성과 시간 영역 펄스 품질의 변화를 정량적으로 분석하였다. 실험에 사용된 레이저 시스템은 전광 변조 방식의 주파수 빔을 시드로 하며, 2단 광섬유 증폭기를 통해 8 GHz 반복률,

24 W 평균 출력, 3.3 ps 펄스폭의 피코초 펄스를 생성한다. 스펙트럼 성형 이전에는 광 스펙트럼의 3 dB 대역폭이 1.47 nm이며, 중심 파장 대비 사이드 피크의 세기 차이가 7.47 dB로 나타났으나, 0.7 nm 가우시안 필터를 적용한 후에는 대역폭이 0.81 nm로 감소하면서 중심 성분이 강화되고 사이드 피크가 효과적으로 억제되었다.

주파수 분해 광 게이팅 측정 결과, 성형이 적용되지 않은

경우에는 압축되지 않은 넓은 주파수 분포와 시간 영역에서 강한 펄스 주변부 신호가 관찰된 반면, 성형 후에는 에너지가 시간 축 중심에 집중되고 펄스 주변부 신호가 감소하여 펄스 밀집도가 향상된 것을 확인하였다. 자기상관 측정에서도 스펙트럼 성형을 적용한 경우 펄스폭은 3.3 ps로 동일했으나, 중심부 에너지 집중도는 53.1%에서 92.8%로 증가하여 약 39.7%p의 향상을 보였다. 이때 최종 레이저 출력은 이득 포화 상태에 도달하여 스펙트럼 성형 여부와 관계없이 일정하게 유지되었으며, 출력 변화 없이 에너지 밀집도가 크게 향상됨을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 스펙트럼 성형이 전광 주파수 빔 기반 펄스 레이저의 시간적 품질을 실질적으로 개선할 수 있는 효과적인 방법임을 실험적으로 입증하며, 향후 정밀 가공 및 고출력 응용 분야에서의 활용 가능성을 뒷받침한다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국기계연구원의 기본사업(No. NK255B, 2025)으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Gattass, R. R., Mazur, E., (2008), Femtosecond laser micromachining in transparent materials, *Nature Photonics*, 2(4), 219-225.
- Ahn, S., Choi, J., Noh, J., Cho, S. H., (2018), High aspect ratio nanoholes in glass generated by femtosecond laser pulses with picosecond intervals, *Optics and Lasers in Engineering*, 101, 85-88.
- Senn, F., Holtz, R., Gross-Barsnick, S. M., Reisinger, U., (2018), Influencing the crystallization of glass-ceramics by ultrashort pulsed laser irradiation after nucleation, *New Journal of Glass and Ceramics*, 8(1), 1-11.
- Waugh, D. G., Walton, C. D., (2021), Micro-machining of diamond, sapphire and fused silica glass using a pulsed nanosecond Nd: YVO4 laser, *Optics*, 2(3), 169-183.
- Chichkov, B. N., Momma, C., Nolte, S., Von Alvensleben, F., Tünnermann, A., (1996), Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, *Applied Physics A*, 63, 109-115.
- Müller, M., Aleshire, C., Klenke, A., Haddad, E., Légaré, F., Tünnermann, A., Limpert, J., (2020), 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser. *Optics Letters*, 45(11), 3083-3086.
- Stark, H., Buldt, J., Müller, M., Klenke, A., Limpert, J., (2021), 1 kW, 10 mJ, 120 fs coherently combined fiber CPA laser system, *Optics Letters*, 46(5), 969-972.
- Liu, H., Qiu, J., Chen, Y., Wang, H., Wang, T., Liu, Y., Song, X., Fan, Z., (2024), 1.2 kW, 20 kHz Nanosecond Nd: YAG Slab Laser System, *Photonics*, 11(4), 297.
- Yan, D., Liu, B., Zou, D., Guo, J., Chu, Y., Song, Y., Hu, M., (2021), Spectral filtering effect on multi-pulsing induced by chirped fiber Bragg grating in dispersion-managed mode-locked Yb-doped fiber lasers, *High Power Laser Science and Engineering*, 9(e46), 1-7.
- Du, S., Shen, X., Liang, W., Wang, P., Liu, J., Li, R., (2023), A 100-PW compressor based on single-pass single-grating pair, *High Power Laser Science and Engineering*, 11(e4), 1-12.
- Gao, M., Li, Y., Song, D., Li, D., Liu, Q., (2025), All-fiber chirp tuning of ultrashort pulses via long chirped fiber Bragg grating pair, *Optics Letters*, 50(4), 1105-1108.
- Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Elahi, P., Çetin, B., Kesim, D. K., Akçaalan, Ö., Yavaş, S., Aşık, M. D., Öktem, B., Hoogland, H., (2016), Ablation-cooled material removal with ultrafast bursts of pulses, *Nature*, 537(7618), 84-88.
- Kerse, C., Kalaycıoğlu, H., Elahi, P., Akçaalan, Ö., Ilday, F. Ö., (2016), 3.5-GHz intra-burst repetition rate ultrafast Yb-doped fiber laser, *Optics Communications*, 366, 404-409.
- Park, I. C., Park, E. K., Oh, Y. J., Jeong, H., Kim, J. W., Lee, J. S., (2023), High power 1.83 ghz femtosecond yb-doped fiber laser incorporating repetition rate multipliers, *Current Optics and Photonics*, 7(6), 732-737.
- Bartulevicius, T., Lipnickas, M., Petrauskiene, V., Madeikis, K., Michailovas, A., (2022), 30 W-average-power femtosecond NIR laser operating in a flexible GHz-burst-regime, *Optics Express*, 30(20), 36849-36862.
- Wu, R., Torres-Company, V., Leaird, D. E., Weiner, A. M., (2013), Supercontinuum-based 10-GHz flat-topped optical frequency comb generation, *Optics Express*, 21(5), 6045-6052.
- Aubourg, A., Lhermite, J., Hocquet, S., Cormier, E., Santarelli, G., (2015), Generation of picosecond laser pulses at 1030 nm with gigahertz range continuously tunable repetition rate, *Optics Letters*, 40(23), 5610-5613.
- Song, M., et al. (2021), Flat-top supercontinuum generation via gaussian pulse shaping, *Optics Express*, 29(8), 12001-12009.
- Jang, Y. S., Eom, S., Park, J., Jin, J., (2024), Programmable spectral shaping for nanometric precision of frequency comb mode-resolved spectral interferometric ranging, *Optics & Laser Technology*, 170, 110324.
- Parriaux, A., Hammani, K., and Millot, G., (2020), Electro-optic frequency combs, *Advances in Optics and Photonics*, 12(1), 223-287.
- Carlson, D. R., Hickstein, D. D., Zhang, W., Metcalf, A. J., Quinlan, F., Diddams, S. A., and Papp, S. B., (2018), Ultrafast electro-optic light with subcycle control, *Science*, 361(6409), 1358-1363.



### Junyeong Sung

Student researcher in the Department of Laser & Electron Beam Technologies, Korea Institute of Machinery & Materials. And Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology. His research interest is high-power femtosecond lasers and fiber lasers.

E-mail: sjy5060@kimm.re.kr



### Yeong Gyu Kim

Senior Researcher in the Dept. of Laser & Electron Beam Technologies Research. His research interests are spatiotemporal characterization of ultrafast laser pulses.

E-mail: ygkim@kimm.re.kr



### Byungjoo Kim

Senior researcher in the Department of Laser & Electron Beam Technologies, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interests are high-power femtosecond fiber lasers and quantum technology.

E-mail: byungjookim@kimm.re.kr



### Jiyeon Choi

Principal researcher in the Dept. of Laser & E-Beam Technologies, Korea Institute of Machinery & Materials. Professor in the Dept. of Mechanical Engineering, University of Science and Technology. Her research interest includes ultrafast laser 3D glass processing.

E-mail: jchoi@kimm.re.kr



### Sanghoon Ahn

Head of Laser and E-beam Application department, Korea Institute of Machinery and Materials. And Professor in the Department of Mechanical Engineering, University of Science and technology. His research interest is spatio-temporal beam shaping for semiconductor and display industry.

E-mail: shahn@kimm.re.kr



### Geon Lim

Senior researcher in the Department of Laser & Electron Beam Technologies, Korea Institute of Machinery & Materials. His research interests lie in the development of high-power femtosecond and fiber laser systems, particularly focusing on their applications in super-resolution microscopy and direct laser writing for advanced micro/nanofabrication.

E-mail: gun@kimm.re.kr



### Hyonkee Sohn, Ph.D.

Principal researcher in the Department of Laser & Electron-beam Technologies, KIMM. His research interests are in the development of laser materials processing technologies and optical systems.

E-mail: hsohn@kimm.re.kr



### Dohyun Kim

Senior researcher in the Department of Laser & Electron Beam Technologies, Korea Institute of Machinery & Materials. And associate professor in the Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology. Her research interests are high-power femtosecond lasers and fiber lasers.

E-mail: kimdohyun19@kimm.re.kr