

## 단일 펄스 피코초 대조비 측정을 위한 처프 컨볼루션 방법

### Chirped Convolution Method for the Single-shot ps Contrast Ratio Measurement

유태준, 성재희, 이성구, 고도경, 이종민

광주과학기술원 고등광기술연구소

tjyu@gist.ac.kr

CPA(Chirped pulsed amplification)방식을 통해 레이저 펄스를 수십 펨토초( $10^{-15}$ )란 극히 짧은 시간 영역 안에 가두고, 동시에 집속 광학계를 통해 이를 수  $\mu\text{m}$ 의 공간에 강하게 집속시키면, 레이저 펄스의 광 밀도가  $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ 이상인 특별한 공간이 생성된다. 이런 극한의 물리적 공간 영역에서 레이저와 상호작용에 의해 움직이는 전자들과 이온입자들이 상대론적 운동을 하기에 상대론적 광학<sup>(1)</sup>이라 부른다.

이런 실험을 할 때 다양한 종류의 표적들에 레이저 펄스가 집속되는데, 시간적 품질 즉 대조비(contrast ratio)가 높지 못하면 레이저 펄스가 표적에 도달하기 전에 미리 표적이 증발해 버리는 경우가 있다. 따라서 레이저 펄스의 시간적인 구조가 어떻게 되어있으며, 얼마나 깨끗한, 즉 높은 대조비를 가지는 펄스인가를 측정하는 기술이 필요하다. 이를 측정하는 기존의 기술은 third-order cross correlation<sup>(2)</sup>이다. 이 기술은 대조비를 측정하고자 하는 펄스 자기 자신을 두 개로 나누어 비선형 pump-probe (self reference nonlinear pump-probe method) 방식을 통하여 측정한다. 이 pump-probe 방식을 기반으로 한 대조비 측정은 적어도 수천에서 수만 개의 레이저 펄스가 필요하다. 하지만 페타와트 급의 레이저 펄스는 하루에 10번 이상 발생하기 어렵기 때문에 기존의 대조비 측정 기술로는 대조비를 측정할 방법이 없다. 따라서 반복율이 극히 낮은 페타와트 급 레이저 펄스의 시간 품질을 진단하기 위해서는 단 한 번의 레이저 펄스로도 100 ps 영역의 대조비 및 레이저 펄스의 구조를 측정할 수 있는 기술이 필요하다. 이 문제를 해결하기 위하여 기존의 cross correlation에 기반을 둔 pump-probe 방식에서 벗어나, chirped convolution이란 새로운 개념을 제안하였다. 이 개념으로 어떻게 단일 펄스로도 레이저 대조비를 측정할 수 있는가를 전산 시뮬을 통하여 증명하였다. chirped convolution의 기본 개념은 대조비를 측정하고자 하는 펄스 자기 자신을 먼저 두 개로 나눈다. 이때 한 펄스에 chirp를 강하게 걸어 레이저의 앞단과 뒷단의 파장이 시간적으로 종속되게 하고 이 왜곡된 펄스와 왜곡되지 않은 다른 펄스를 비선형 결정에 주파수 합성(sum frequency generation)을 한다. 이 과정은 식1)과 식2)로 표현된다.

$$E_3(\Omega) = \chi^{(2)} \frac{\omega_1^2}{c^2 k_3} \int \left( \frac{1 - e^{-i(\Delta k(\Omega) + \Delta k(\Omega, \Omega')) \cdot L}}{(\Delta k(\Omega) + \Delta k(\Omega, \Omega')) \cdot L} \right) E_1(\Omega - \Omega') \cdot \tilde{E}_2(\Omega') d\Omega' \quad \text{식 1)}$$

$$\Delta k(\Omega) = k_1(\Omega) + k_2(\Omega) - k_3(2\Omega), \quad \Delta k(\Omega, \Omega') = k_1(\Omega') + k_2(\Omega - \Omega') - k_3(2\Omega) \quad \text{식 2)}$$

이때 생성된 스펙트럼( $E_3$ )은 원래의 펄스( $E_1$ )와 강한 chirp를 걸어준 펄스( $E_2$ )간, 즉 두 개의 펄스간의 convolution 관계가 있다. 이는 주파수 합성에 기인해서 식 1과 같이 주어지며, 주파수 합성을 하는 비선형 결정의 위상 정합조건을 고려하면 식 2와 같이 주어진다. 이 chirped convolution 개념을 실제적으로 구현하기 위한 광학계는 그림 1과 같이 제안하며, 이런 광학계에서 단일 펄스로 피코초 영역의 대조비를 구하기 위한 전산 시뮬 결과는 그림 2와 같다.

본 발표에서는 기존의 pump probe 방식에 의한 cross correlation 방식에서 벗어나 새로운 방식, 즉 chirped convolution 방식을 통해 단일 펄스로도 레이저 펄스의 대조비와 시간 구조를 측정할 수 있음을 전산 시뮬을 통하여 증명하였다. 따라서 그동안 낮은 반복율을 가지는 레이저 시스템에서의 대조비와 레이저 펄스의 시간 구조를 분석하는데 있어서의 기술적 난제를 해결할 새로운 방식을 제시하였으며, 이 새로운 방식은 상대론적 광학 응용 실험에 있어서 실

질적이고 유용할 것으로 전망한다.

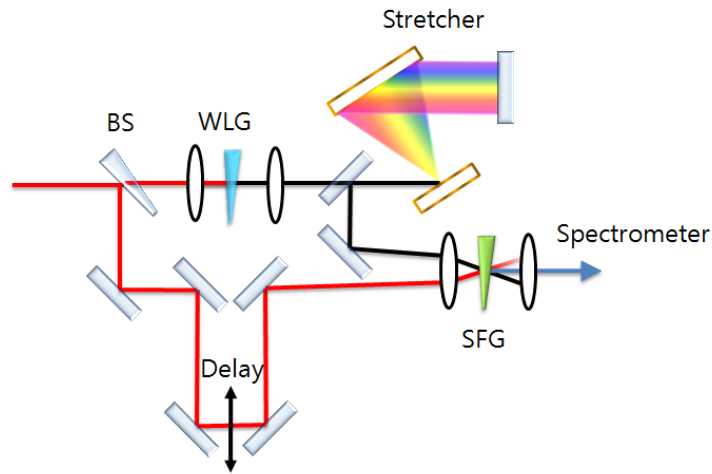


그림 1. 단일 펄스로 레이저 펄스의 대조비(contrast ratio)를 측정하기 위한 광학계: BS(Beam Splitter), WLG(White Light Generation), SFG(Sum Frequency Generation)

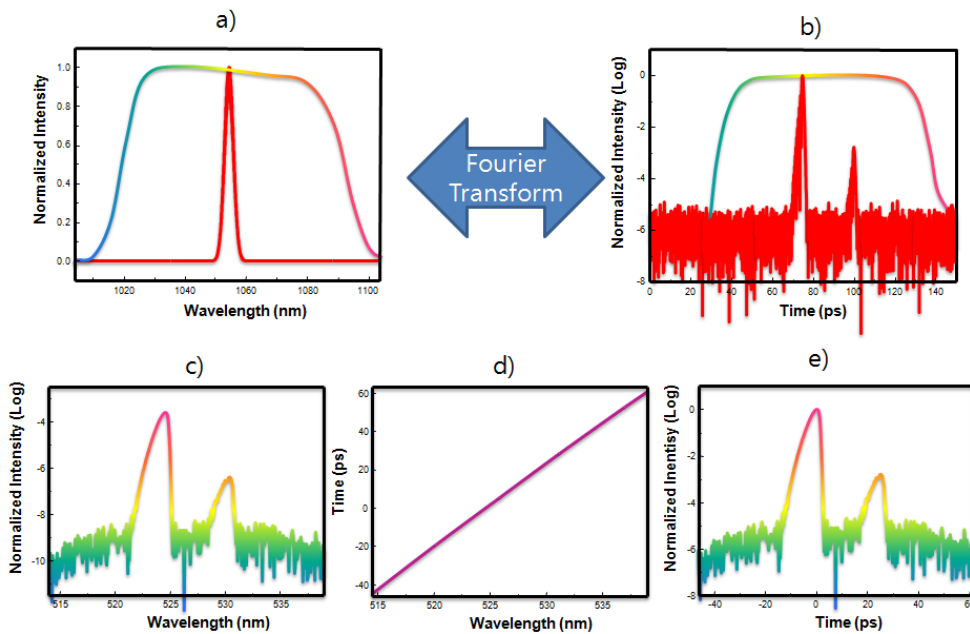


그림 2. a) 대조비를 측정하고자 하는 원래 펄스의 스펙트럼과 그림 1에서 WLG을 통해 광대역으로 넓혀진 스펙트럼, b) 이 두 펄스가 그림 1에서 SFG에 집속되는 지점에서의 시간적인 구조, c) 그림 1에서 SFG과정을 통해 얻은 스펙트럼, d) stretcher의 분산관계, e) d)의 분산을 이용하여 복원된 레이저 펄스의 시간적 구조

1. Gerard A. Mourou, Toshiki Tajima, and Sergei V. Bulanov, "Optics in the relativistic regime", Rev. Mod. Phys. **78**, 309-371 (2006).
2. G. Preibe, K. A. Janulewicz, V.I. Redkorechev, J. Tummler, and P. V. Nickles, "Pulse shape measurement by a non-collinear third-order correlation technique", Opt. Comm. **15**, 848-851 (2006)