

지속시간 펄토초 수준의 빛펄스를 재는 이차조화파발생 프로그램(SHG FROG) 장치 개발

양병관 · 김진승[†]

전북대학교 부설 광전자정보기술연구소
☎561-756 전북 전주시 덕진동 1가 664-14

(2004년 3월 15일 받음, 2004년 5월 20일 수정본 받음)

지속시간이 펄토초 수준에 이르는 빛펄스의 전기장 및 위상의 시간적 변화를 잴 수 있는 “이차조화파 발생 프로그램(SHG FROG: Second Harmonic Generation Frequency Resolved Optical Gating)” 장치 및 소프트웨어를 개발하고, 성능을 확인하였다. 이 장치를 써서 잰 실험값으로부터 빛펄스를 복원하는데는 “주요성분 일반 투영(PCGP: Principal Component Generalized Projection)” 방식에 더하여 프로그램 궤적의 주파수 및 시간지연 “한계값(marginal)”과 이차조화파의 분광분포에 대한 조건을 덧붙임으로써 복원과정의 안정성과 수렴속도를 개선하였다.

주제어 : SHG FROG, ultrashort laser pulse, phase retrieval, PCGP

I. 서 론

지속시간이 펄토초 수준에 이르는 극초단 빛펄스(ultrashort laser pulse)는 각종 초정밀계측, 미세구조 제작, 각종 재료의 정밀가공, 플라즈마 발생, 비선형 광학등에 널리 응용되며, 앞으로 그 쓰임새가 더욱 확대될 것이다.^[1,2] 이러한 앞으로의 잠재적 중요성을 생각하여 일본에서는 일찍부터 이와 관련된 연구집단을 만들고 이 분야의 연구 활동을 확대하여 그 수준을 높여 왔다.^[3] 국내에서는 화학, 물리 등의 분야에서 연구를 진행하여 왔고,^[4-6] 최근에는 “극초단 광양자빔 연구 시설(Ultrashort Quantum Beam Facility)”이 광주과학기술원 부설 고등광기술원에 구축될 예정이므로 앞으로는 이를 바탕으로 이 분야의 연구자가 확대되고 연구활동도 활성화되어 수준이 높아질 것으로 기대된다.^[7] 극초단 빛펄스의 활용에서 가장 먼저 할 일은 극초단 빛펄스를 만들고, 그 특성을 정확하게 재는 것이다. 이를 바탕으로 빛펄스의 특성을 마음먹은 대로 조절하여 쓰임새에 가장 잘 맞는 것을 만들어 쓰으로써 최선의 결과를 기대할 수 있다. 극초단 빛펄스를 만들어 쓸 때, 그 결과의 정확성과 신뢰성을 높이려면 빛펄스의 특성 - 파장분포, 펄스 진폭과 위상의 시간변화 - 에 관한 정확한 정보가 요구되는데, 지속시간이 수백-수펄토초 수준의 극초단 빛펄스는 지속시간이 아주 짧아서 이러한 특성을 재는데 어려움이 많았다.

빛펄스의 특성을 알고자 전통적으로 많이 써온 자체상관법은 펄스의 함수 꼴을 가정하고 자체상관기로 재어 얻은 자체상관신호를 바탕으로 빛펄스의 지속시간의 대략적인 값을 어렵할 뿐이다. 자체상관함수와 “분광분포(spectrum)”를 써서 빛펄스를 온전히 결정하려는 시도가 있었으나 애매함이

남아있거나 변별력이 떨어지는 것으로 밝혀졌다.^[8,9] 그러나 최근 수 년 동안 빛펄스의 전기장 및 위상의 분포를 펄스의 함수 꼴에 대한 어떤 가정도 없이 온전히 결정할 수 있는 “프로그램(FROG: Frequency Resolved Optical Gating)”를 비롯한 몇 가지 방법이 제안되었고, 실용성이 입증되었다.^[10-14]

특히 프로그램은 자체상관기에서 광검출기를 “분광기(spectrometer)”로 바꿔 놓은 것으로 구조가 간단하고 “펄스 하나(single-shot)” 방식을 쓰면 낱알의 펄스 특성도 잴 수 있다.^[15] 또한 “이차조화파 발생 프로그램 (SHG FROG: Second-Harmonic Generation Frequency-Resolved Optical Gating)”는 비록 시간 역진성에 대한 애매함이 남아 있지만 “삼차조화파 발생 프로그램(THG FROG: Third-Harmonic Generation Frequency-Resolved Optical Gating)”에 비해 감도가 좋은 장점이 있다.^[16]

이미 극초단 빛펄스의 특성을 재는 장치로서 자체상관기와 프로그램 장치는 몇 가지가 상품으로 나와 있다.^[17] 그렇지만 이들 상품은 구성이 비교적 단순함에도 불구하고 값이 이만불 가까운 수준이어서 연구비 규모가 크지 않은 우리나라의 연구자들의 현실에서는 그림의 떡이다. 프로그램 장치는 구성이 비교적 단순하지만 그렇다고 하여 부품만 마련하여 기기를 구성하면 곧바로 빛펄스의 특성을 만족스럽게 잴 수 있는 것도 아니다. 프로그램 장치를 써서 얻은 빛펄스에 대한 측정 결과로부터 빛펄스의 진폭과 위상의 시간적 변화 또는 파장에 따른 변화를 정확하게 찾아내는 데는 복잡하고 정교한 프로그램이 요구되는데, 효율적이고 안정적이며 정확한 결과를 내는 프로그램을 개발하는 일은 그렇게 만만하지 않다. 그러므로 프로그램 원리를 써서 지속시간이 펄토초 수준에 이르는 극초단 펄스 측정장치의 구성에 관한 상세한 규격을 정하고, 그 장치를 써서 얻는 측정자료를 빠르고 효율적으로 처리하여 펄스의 진폭과 위상에 관한 정확한 자료를 얻어내는 소프트웨어를 개발하고, 보급하는 것은 가치있는 일이다.^[18]

[†]E-mail: jin@chonbuk.ac.kr

본 논문의 주 내용은 SHG FROG 방식의 빛펄스 측정 장치의 개발에 관한 것이다. 2장에서는 SHG FROG 장치의 구성 원리 및 실제 장치구성과 빛펄스를 복원하는 프로그 알고리즘에 대해서 자세히 설명한다. 3장에서는 우리가 만든 프로그 장치를 써서 빛펄스를 측정 한 결과와 위상복원에 쓴 “주요성분 일반투영(PCGP: Principal Component Generalized Projection)” 알고리즘^[9]의 개선 방법에 대해서 설명한다.

II. 이차조화파 발생 프로그(SHG FROG)

이차조화파 발생 프로그를 써서 빛펄스를 재는 일은 크게 두 부분으로 나뉜다. 프로그 장치를 구성하는 것과 프로그 장치를 써서 켜 극초단 빛펄스의 프로그 궤적으로부터 빛펄스의 진폭과 위상의 시간변화를 복원하는 것이다.

2.1. 이차조화파 발생 프로그 장치구성

우리가 만든 이차조화파 발생 프로그 장치의 개략적인 구성은 그림 1과 같다.^[10,11] 특성을 재야 할 빛펄스를 모양이 같은 두 가닥으로 나누고, 그 가운데 한 가닥의 경로를 조절하여 상대적 시간지연을 준다. 이 후 두 가닥의 빛을 다시 모아 비선형 광학결정에 넣어 이차조화파를 만들고 이것의 분광분포를 잰다. 이렇게 켜 분광분포를 시간지연과 파장을 각각 직교하는 두 좌표축으로 삼아 이차원적으로 배열한 것이 빛펄스의 “프로그 궤적(FROG trace)” 또는 “스펙트로그램(spectrogram)”이다.

빛펄스의 이차조화파를 만들어내는 비선형 광학결정으로는 BBO를 썼는데, 이것은 800-*nm*에서 제 1 유형의 “위상맞춤(phase matching)”이 이루어진다. BBO 결정의 두께는 100- μm 로서 위상맞춤 대역폭은 약 49-*nm*가 되어 실험에서 재려는 지속시간 약 100-*fs*인 빛펄스의 분광대역폭 10-*nm*보다 충분히 크다. 실제 실험에서는 비선형 결정의 위상맞춤 각은 빛펄스의 중심파장에 따라 조절한다. 포물면 반사거울의 초점

거리는 38.1-*mm*인데 반사거울의 중심축과 초점 사이의 거리는 76.2-*mm*이다. 포물면 반사거울을 구면거울로 근사하면 “공초점 매개변수(confocal parameter)”는 약 1.3-*mm*로 비선형 결정의 두께보다 훨씬 크다.

시간지연은 반사 거울의 위치를 조절하여 변화시키는데, He-Ne 레이저(파장 633-*nm*)를 광원으로 한 마이켈슨 간섭계를 덧붙여 실제 이동거리를 정확히 잰다. 분광분포의 측정은 마이켈슨 간섭계의 간섭신호가 골과 마루일 때 이루어 졌는데, 이에 대응되는 시간지연 간격은 약 1.06-*fs*이다. 반사거울이 이동하면 특성을 켜 빛펄스의 간섭조건이 달라지므로 이차조화파의 밝기 또한 변한다. 그 결과 이차조화파의 분광분포가 시간지연에 따라 물결무늬의 간섭신호가 나타나는데 이런 효과를 없애기 위해서 각 스텝에서의 분광분포를 평균했다. 각 시간지연에서 생긴 이차조화파는 비선형 결정에서 만들어지는 기본파의 간섭무늬, 즉 여러 시간지연에 의해 동시에 생긴 이차조화파의 신호인데 이것을 “시간 스머들(time smearing)”이라 한다^[20]. 시간 스머들이 생기면 프로그 궤적으로부터 복원되는 빛펄스의 지속시간은 참값보다 더 크게 나온다. 이런 효과를 없애기 위해서 분광계 앞에 이차조화파 신호를 모으는 집속광학계를 두지 않았다. 다만 이차조화파가 분광계의 입사 슬릿에 나란하게 들어가도록 비선형 결정에 초점을 맞춘 초점거리 200-*mm*인 원통렌즈를 뒀다. 분광계측장치의 입사 슬릿의 폭은 5- μm , 분해능은 약 0.5-*nm*이다. 빛펄스의 평균 출력은 약 20-*mW*가 되도록 감쇠시켰다. 저역투과 필터는 기본파는 차단하고, 이차조화파는 투과시킨다. 포물면 반사경에 입사하는 두 가닥의 빛다발 사이의 거리는 약 2.5-*mm*이므로 비선형 결정에 입사하는 두 펄스 사이의 각은 약 2도이다.

측정에서는 두 펄스의 상대적 시간지연에 대한 분광분포인 프로그 궤적을 재는데 시간지연과 파장(또는 진동수)의 함수로서 다음과 같은 꼴이다:

$$I_{FROG}(\omega, \tau) = \left| \int E_{sig}(t, \tau) \exp(-i\omega t) dt \right|^2, \quad (1)$$

$$E_{sig}(t, \tau) \equiv E(t)E(t-\tau)$$

여기에서 전기장 $E(t)$ 를 $E^*(-t)$ 로 바꿔도 프로그 궤적은 달라지지 않는다. 그래서 이차조화파 발생 프로그에서는 $E(t)$ 과 $E^*(-t)$ 를 구별하지 못하는 시간 반전에 대한 애매함이 있고, 프로그 궤적은 좌우대칭꼴이다. 이것이 3차 비선형 효과를 쓰는 다른 프로그 방식과 다른 점이다. 그러나 다음에 설명하겠지만 유리막대와 같은 분산성 매질을 지나게 하여 펄스에 “새울음(chirping)”을 실어 측정한 결과와 비교하면 시간 반전에 대한 애매함은 쉽게 없앨 수 있다. 그 밖에 $E(t)$ 에 일정한 위상을 더하거나 $E(t)e^{i\phi}$, 또는 시간축을 따라 병진이동을 한 경우 $E(t-t_0)$ 도 같은 FROG 궤적을 갖는다. 결국 절대위상과 시간이동에 대한 애매함이 있는 상태로 빛펄스를 복원한다. 주의할 점은 시간이동을 하면 “주파수 영역(frequency domain)”에서는 주파수의 크기에 비례하는 위상을 분광위상에 더하게 된다.

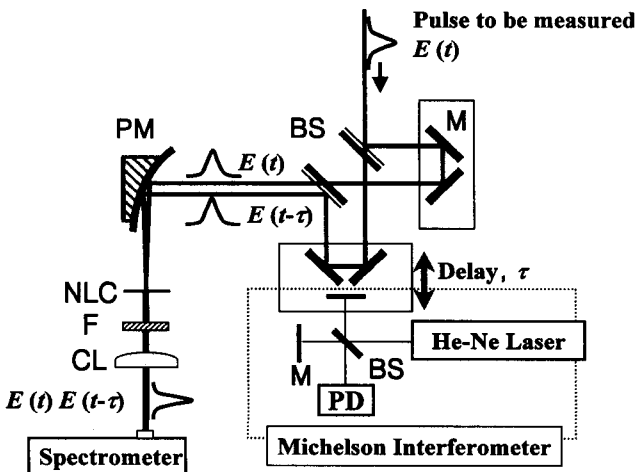


그림 1. SHG FROG의 장치 구성도

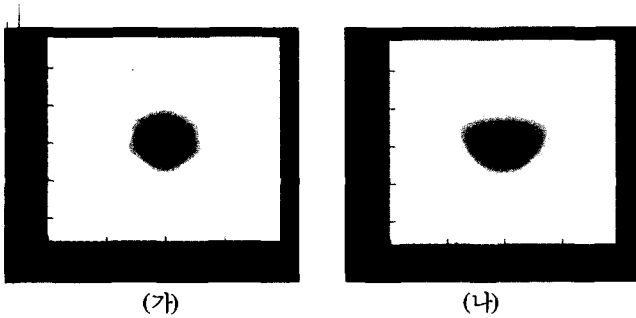


그림 2. 새울음이 거의 없는 100- μ s 빔펄스(가)와 5-cm의 BK7 막대를 지난 빔펄스(나)의 프로그 궤적.

그림 2는 우리가 개발한 장치로 얻은 프로그 궤적이다. 그림 2(가)는 중심파장이 780-nm인 새울음이 거의 없는 지속시간이 약 100- μ s인 빔펄스로부터 곧바로 얻은 궤적이고, 그림 2(나)는 이 빔펄스가 5-cm의 BK7을 지나게 하여 새울음을 실은 뒤 얻은 프로그 궤적이다. 프로그 궤적은 측정된 궤적에서 좌우 대칭인 성분만을 찾아낸 것이고, 좌우 대칭이 되는 축을 시간축의 원점으로 조정하였다. 고주파 잡음을 없애기 위해서 “푸리에 걸러냄(Fourier filtering)”을 했다. 프로그 궤적의 크기는 64×64이다. 새울음이 없는 가우스 함수 꼴의 빔펄스의 프로그 궤적은 일반적으로 타원형이다.

일단 프로그 궤적을 얻으면 펄스복원 알고리즘을 써서 빔펄스의 밝기와 위상의 분포를 시간 및 주파수의 함수로 얻을 수 있다.

2.2. 빔펄스의 복원

프로그 궤적으로부터 빔펄스를 복원하는 과정에서 “반복적 푸리에 변환(iterative Fourier transform)”을 쓰는데(그림 3 참고),^[21] 시간영역과 주파수 영역을 오가면서 수학적 구속조건과 실험자료의 구속조건을 함께 만족하는 빔펄스의 전기장 $E(t)$ 을 찾는 것으로서 그 순서는 다음과 같다: 먼저 전기장 $E(t)$ 의 진폭과 위상의 어렵값을 마음대로 정한다. 이 어렵값을 써서 신호 전기장 $E_{sig}(t, \tau)$ 를 셈하고(수학적 구속조건), 이것을 시간 t 에 대해 푸리에 변환하여 주파수 영역에서의 신호값 $\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)$ 를 만든다. 그 다음 이 신호값의 진폭을 실험에서 얻은 프로그 궤적의 제곱근 $\sqrt{I_{PROC}}(\omega, \tau)$ 으로 바꿔친다(자료 구속조건). 개선된 $\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)$ 를 다시 역푸리에 변환하여 시간영역의 함수 $E'_{sig}(t, \tau)$ 를 구하고, $E'_{sig}(t, \tau)$ 을 잘 만족하는 $E(t)$ 에 관한 새로운 어렵값을 만든다. 이상적인 상황에서는 이 과정을 되풀이할 때마다 더 나은 어렵값이 얻어지며, 궁극적으로는 정확한 복소 전기장에 수렴한다. 이 순환과정의 마지막 단계에서 신호값 $E'_{sig}(t, \tau)$ 으로부터 새로운 어렵값 $E(t)$ 를 결정하는 방식에 따라 프로그 알고리즘이 구별되는데 이 연구에서 개발한 프로그램에서는 펄스복원을 거의 실시간에 할 수 있고 비교적 견고한 “주요 성분 일반투영법(PCGP)”을 썼다(그림 3).^[19]

PCGP 알고리즘은 식 (1)의 신호 전기장 $E_{sig}(t, \tau)$ 를 “탐지 펄스(probe pulse)” $P(t)$ 와 “문 펄스(gate pulse)” $G(t)$ 의 곱

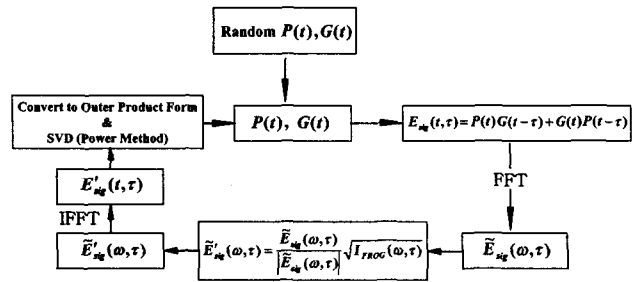


그림 3. PCGP 알고리즘.

으로 본다. 탐지 펄스와 문 펄스의 외적 함수 $O = P \cdot G^T$ 은 아래와 같다:

$$O = \begin{pmatrix} P_1G_1 & P_1G_2 & \dots & P_1G_N \\ P_2G_1 & P_2G_2 & \dots & P_2G_N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_NG_1 & P_NG_2 & \dots & P_NG_N \end{pmatrix} \quad (2)$$

N 은 빔펄스를 시간축으로 이상등분한 수이다. 이것을 가로줄을 가로줄의 (행 번호-1)만큼 왼쪽으로 이동시키면 아래와 같이 되고, 이것의 세로줄을 시간 지연 순으로 재배열하면 신호 전기장 $E_{sig}(t, \tau)$ 이 된다.

$$\begin{pmatrix} P_1G_1 & P_1G_2 & \dots & P_1G_N \\ P_2G_2 & P_2G_3 & \dots & P_2G_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_NG_N & P_NG_1 & \dots & P_NG_{N-1} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$\tau = 0 \quad -\Delta t \quad \dots \quad \Delta t$

알고리즘에서는 되풀이 과정의 마지막 단계에서 신호값 $E'_{sig}(t, \tau)$ 의 행렬 요소를 $P(t)$ 와 $G(t)^T$ 의 “바깥쪽 곱 행렬(outer product form matrix)” $O(t, \tau)$ 로 바꾼다. 즉, 신호값 $E'_{sig}(t, \tau)$ 의 세로줄을 식 (3)과 같은 순서로 바꾼 후, 다시 각각의 가로줄을 (행 번호-1)만큼 오른쪽으로 이동시킨다. 그 다음에 바깥쪽 곱 함수 $O(t, \tau)$ 를 “특이값 분해(SVD: singular value decomposition)”하여 다음과 같이 세 행렬의 곱으로 나타낸다.

$$O = U \times W \times V^T \quad (4)$$

여기에서 U 와 V^T 는 직교 정방행렬이고, W 는 대각화된 정방행렬이다. 이제 바깥쪽 곱 함수 $O(t, \tau)$ 는 U 의 세로줄로 나타나는 탐지 펄스열과 V^T 의 가로줄로 나타나는 문 펄스열에 의해 만들어진 바깥쪽 곱 행렬의 중첩으로 볼 수 있는데 W 의 대각 성분이 계수가 된다. W 의 대각 성분 가운데 제일 큰 값에 대응하는 U 의 세로줄 벡터와 V^T 의 가로줄 벡터를 각각 다음 되풀이 과정의 탐지 펄스 $P(t)$ 와 문 펄스 $G(t)$ 에 대한 어렵값으로 쓴다. 프로그램의 실제 구현은 특이값 분해

를 하지 않고 “제곱법(Power method)”을 쓴다. 또한 탐지 펄스 $P(t)$ 와 문 펄스 $G(t)$ 가 서로 독립이 아니므로 바깥곱 함수 O 는 아래와 같이 구한다:

$$O = P \cdot G^T + G \cdot P^T \quad (5)$$

빛펄스의 복원 정도는 프로그 오차로부터 짐작하는데, k -번째 순환과정에서 프로그 오차는 측정된 프로그 궤적과 재구성한 프로그 궤적의 “제곱평균제곱근(RMS: root mean square)” 오차로 다음과 같이 정의 한다:

$$G^{(k)} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{\omega, \tau} |I_{FROG}(\omega, \tau) - \mu I_{FROG}^{(k)}(\omega, \tau)|^2} \quad (6)$$

여기서 $I_{FROG}^{(k)}(\omega, \tau)$ 는 k -번째 순환과정에서 재구성한 프로그 궤적으로 식 (1)과 같고, μ 는 프로그 오차 $G^{(k)}$ 이 최소가 되는 상수이다. 이상적인 경우 프로그 오차는 최소값으로 수렴한다.

III. 빛펄스 측정

3.1. 빛펄스 측정

그림 4는 그림 2(가)를 복원한 빛펄스의 밝기와 위상분포이다. 그림 4(가)는 시간영역에서 본 빛펄스의 밝기와 위상이고 그림 4(나)는 주파수 영역에서의 분광분포와 분광위상이다. 실선은 개발한 장치로 잰 결과이고, 마름모와 사각형으로 표시한 곡선은 상용화된 “펄스 하나(single-shot)” 방식의 빛펄스 측정장치(GRENOUILLE, Swamp Optics)¹⁷⁾로 잰 결과이다. 펄스의 중요부분에서 두 결과가 잘 맞는 것을 알 수 있다. 중심주파수 부근에서 두 분광위상이 잘 맞도록 시간축을 따라 시간이동시켜 분광위상을 조정하였고, 시간영역에서는 펄스의 중심에서의 위상을 0으로 조절하였다. 측정 결과는 아직 시간반전에 대한 애매함이 남아있는 상태이다. 즉, 그림 4(가)의 프로그 측정 결과를 보면 밝기가 급격하게 떨어지는 부분이 펄스의 꼬리인데 이 부분이 펄스의 머리일 수도 있다. 실제로 횡수를 거듭해서 빛펄스를 복원해 보면 이 두 경우가 번갈아 나온다. 최종적으로 얻은 결과에 대해 식

(6)으로 정의된 프로그 오차는 0.00273이었다.

빛펄스를 시간에 따라 N 개의 이산등분하여 자료를 뽑으면 전기장은 $2N$ 개의 자유도가 있는데 (진폭과 위상) 여기에 대응되는 FROG 궤적의 값은 N^2 개다. 따라서 프로그 궤적에서 뽑아낸 자료에는 아주 많은 중복성이 들어있는데 이 중복성을 잘 쓰면 프로그 궤적의 정확성을 여러 가지 점검방법으로 확인할 수 있다. 이러한 점검에는 “한계값(marginal)”을 쓰는데, 이것은 이차원 프로그 궤적을 어느 한 좌표에 대해 적분하여 얻은 일차원 곡선이다. 주파수 한계값 $M_\omega(\omega)$ 은 프로그 궤적을 시간지연에 대해 적분한 것으로 SHG FROG의 경우 펄스 분광분포 $S(\omega)$ 의 “자체 콘볼루션(auto-convolution)”과 함수 꼴이 같다:

$$M_\omega(\omega - 2\omega_0) = S(\omega - \omega_0) * S(\omega - \omega_0) \quad (7)$$

여기에서 ω_0 는 빛펄스의 중심 주파수이고 별표는 콘볼루션을 나타낸다. 그림 5(가)는 분광기로 잰 기본파의 분광분포와 복원한 빛펄스로부터 구한 분광분포를 나타내었고, 그림 5(나)는 기본파 분광분포의 콘볼루션과 측정된 프로그 궤적의 주파수 한계값을 비교한 것이다. 장파장에서 미세한 차이를 제외하면, 두 결과가 잘 맞는다. 이 차이는 분광기의 분광감도에 대한 보정을 하지 않았기 때문에 생기는 차이로 보이며, 전체적으로는 실험에서 잰 프로그 궤적에 계통오차가 적고, 빛펄스가 잘 복원되었음을 알 수 있다.

그림 6은 그림 2(나)의 두께 5-cm의 유리막대(BK7)를 지난 다음의 프로그 궤적으로부터 얻은 빛펄스의 분광분포와 분광위상을 나타내었다. 프로그 오차는 0.00182이었다. 다이아몬드 도형은 BK7 유리막대가 없을 때의 기준 펄스이고, 실선은 유리막대를 지난 다음의 것이다. 기준 펄스는 그림 4의 결과와 비슷한데 여기서는 시간 반전한 것이고 그림 4와는 달리 시간축을 따라 이동하지 않았다. 유리막대는 양의 새울음을 주기 때문에 분광위상은 실선으로 표시한 것처럼 아래로 볼록한 모양을 한다. 따라서 실선으로 표시한 분광분포 및 분광위상은 시간 반전의 애매함이 제거된 것임을 알 수 있다. 원형 도형은 기준 펄스의 분광위상에 5-cm의 유리막대

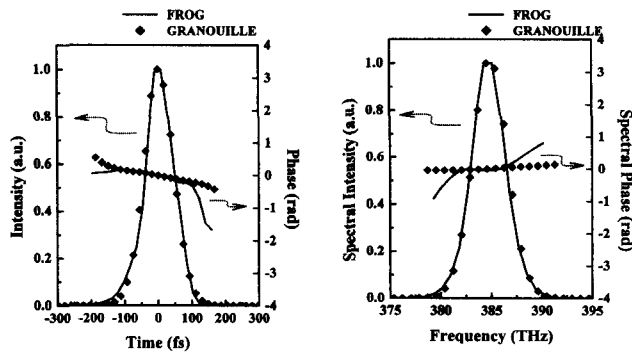
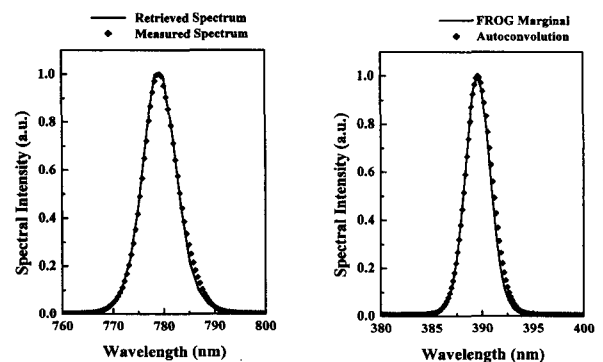


그림 4. 새울음이 거의 없는 100-fs의 복원한 빛펄스의 밝기 및 위상 분포(가)와 주파수 영역에서의 분광분포와 분광위상(나).



(가) (나)
그림 5. 분광분포와 주파수 한계값 비교

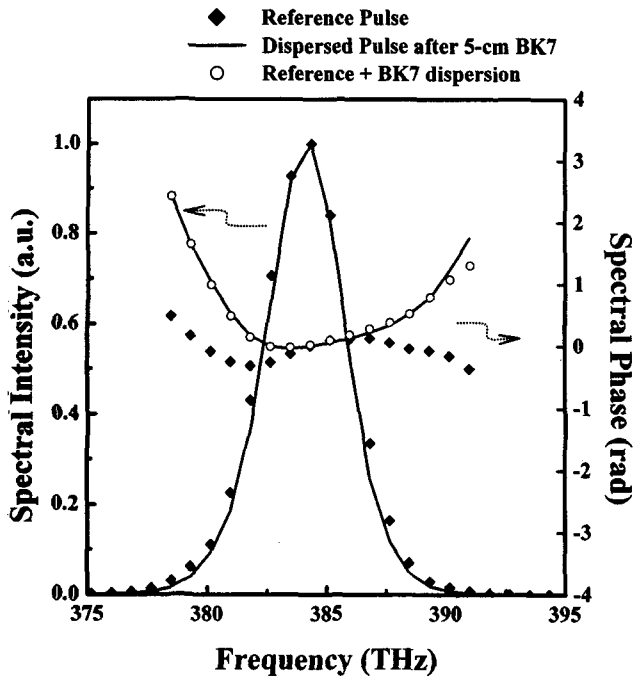


그림 6. 5-cm BK7 막대를 지난 다음의 빛펄스의 분광분포 및 분광 위상 비교.

에 의한 위상변화를 덧붙인 것이다. 유리막대의 굴절률은 Sellmeier 관계식을 써서 구했고, 분광위상은 두 경우가 잘 맞도록 주파수의 크기에 비례하는 선형 분광위상 성분을 뺐다. 그림에서와 같이 분광 위상이 전반적으로 잘 맞는 것을 알 수 있다. 분광분포에서 차이가 조금 생기는데 이것은 유리 막대의 흡수에 의한 효과로 생각된다. 그림 4와 그림 6의 결과로부터 그림 4(가)의 빛펄스는 시간 반전된 즉, 밝기가 급격하게 떨어지는 부분이 펄스의 머리이고, 그림 4(나)의 변두리에서 분광 위상의 차는 프로그램 쟁 본 논문의 결과가 좀 더 신빙성 있어 보인다.

3.2. 주요성분 일반투영 알고리즘의 개선

주요성분 일반투영 알고리즘은 비교적 견고하여 계통오차가 없는 경우에는 거의 대부분 수렴한다. 그러나 잡음의 영향으로 드물게 수렴속도가 정체되는 경우가 생긴다. 또한 처음에 임의의 값으로 시작하므로 같은 프로그램 궤적에 대해서도 수렴하는 과정이 조금씩 달라 펄스 복원 속도가 달라진다. 이 같은 문제는 초기값을 마음대로 정해주기 때문에 생기는 현상이다. 본 논문에서는 임의의 값을 갖는 초기값에 프로그램 궤적으로부터 얻을 수 있는 세 가지 구속조건을 적용하여 이 같은 문제를 개선하였다.

첫 번째 구속조건은 앞에서 언급한 주파수 한계값 $M_\omega(\omega)$ 로부터 얻은 기본파의 분광분포이다. 식 (7)에 콘볼루션 정리를 적용하면 분광분포는 식 (8)과 같다:

$$S(\omega - \omega_0) = \mathcal{F}^{-1}[\sqrt{\mathcal{F}\{M_\omega(\omega - 2\omega_0)\}}] \quad (8)$$

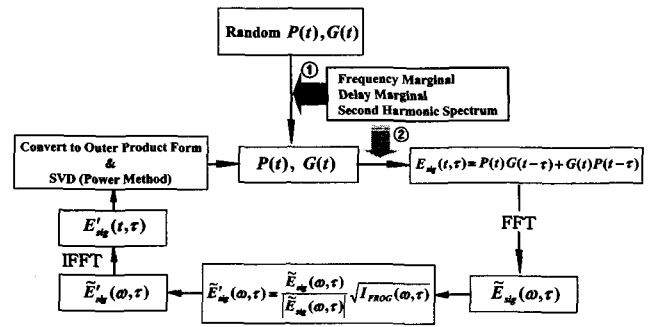


그림 7. 개선된 PCGP 알고리즘.

여기에서 \mathcal{F} 와 \mathcal{F}^{-1} 는 각각 푸리에 변환과 푸리에 역변환을 나타낸다. 프로그램에서는 먼저 임의의 값으로 전기장의 진폭과 위상을 정한다. 이것을 푸리에 변환하여 그 진폭을 식 (8)의 값(분광분포)의 제곱근으로 바꿔친다.

두 번째 구속조건은 시간지연 한계값 $M_\tau(\tau)$ 이다. 시간지연 한계값은 FROG 궤적을 주파수에 대해서 적분한 것으로 자체상관함수와 같다.

$$M_\tau(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)I(t - \tau) dt \quad (9)$$

$I(t)$ 는 펄스의 밝기 분포이다. “자체상관함수 정리(auto-correlation theorem)”를 써서 정리하면 식 (9)는 다음과 같이 된다:

$$|\mathcal{F}\{I(t)\}|^2 = \mathcal{F}\{M_\tau(\tau)\} \quad (10)$$

빛펄스 밝기의 푸리에 변환한 것의 진폭을 식 (10)의 제곱근으로 바꿔친 후 역변환한다. 이것의 제곱근을 구해 처음 빛펄스의 위상과 곱한다. 일반적으로 결과로 얻는 빛펄스의 밝기분포가 식 (10)을 만족하지 않는다. 그러지만 초기의 빛펄스가 측정한 프로그램 궤적의 정확한 해인 경우에는 식 (10)의 조건을 만족하므로 구속조건으로 작용한다.

마지막 구속조건은 시간지연이 영일 때의 이차조화파의 분광분포이다.

$$|\mathcal{F}\{E^2(t)\}|^2 = I_{FROG}(\omega, 0) \quad (11)$$

그림 8은 되풀이 회수에 따른 프로그램 오차의 변화를 나타내었다. 다이아몬드와 동그라미로 나타낸 그림은 구속조건을 적용하지 않은 경우이고, 네모꼴은 초기값에 구속조건을 적용한 경우이다(그림 7의 ①에 구속조건 적용). 구속조건을 적용하지 않으면 초기값을 임의로 정하기 때문에 비록 수렴하기는 하지만 복원하는 과정이 그림에서와 같이 서로 달라지는 경우가 생긴다. 경우에 따라 되풀이 과정을 약 300번 이상해야 한다. 그러나 구속조건을 적용하면 Case (2)와 같은 경우가 거의 생기지 않으며 되풀이 과정의 초기에 빛펄스의 본래 모습을 거의 복원한다. 드물지만 Case (2)의 경우와 같은 일이 생기는데 이런 점을 개선하기 위해서는 되풀이 과정의 처음 수회에 걸쳐 구속조건을 적용하면 된다. 되풀이

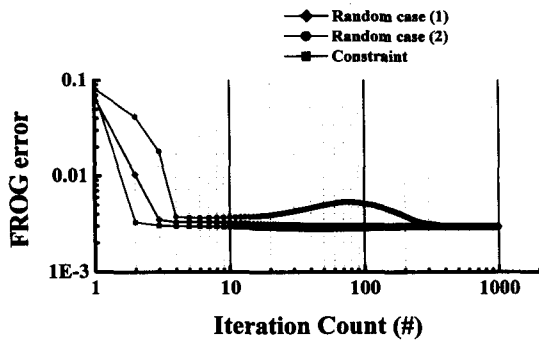


그림 8. 되풀이 횟수에 따른 프로그램 오차의 변화.

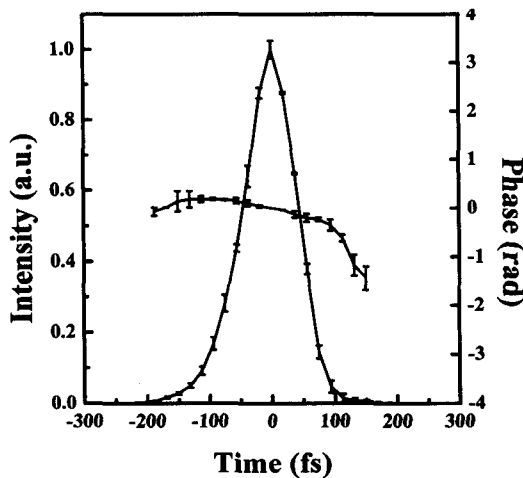


그림 9. 50회 반복 복원한 빛펄스의 평균과 표준편차.

과정 속에 구속조건을 넣으면(그림 7의 ②에 구속조건 적용) 되풀이 과정의 수회 이내에 펄스의 주요부분이 안정되나 밝기가 약한 부분에서 미세한 요동이 생긴다. 이 후 구속조건 없이 되풀이 과정을 계속하면 미세 요동이 없어지고, 프로그램 오차가 떨어진다. 경험적으로 초기값에만 구속조건을 적용할 경우 약 50번 되풀이하면 빛펄스가 충분한 정확도로 복원된다.

그림 9는 되풀이 횟수를 50번으로 제한하고, 빛펄스를 50번 반복 복원한 빛펄스의 평균과 표준편차를 나타내었다. 여기에서는 앞에서와는 달리 규격화를 펄스 에너지가 일정하도록 했고, 평균과 표준 편차를 구한 후 규격화인자를 평균값과 표준편차에 곱해 다시 규격화했다. 여러 번 복원할 때 시간 반전된 모양이 뒤섞여 나오는데 복원하는 중간에 펄스의 시간반전을 조절하여 시간 반전 상태가 일정하도록 했다. 복원을 새로 시작할 때 보통은 빛펄스 전기장을 임의로 선택한 절반만 초기화하는데 여기에서는 모든 순간의 전기장과 위상을 초기화했다. 오차 막대는 ±표준편차로 나타내었다. 밝기가 큰 부분에서 오차가 크게 나오는데 최대 표준편차는 약 0.03이다. 반면에 위상은 펄스의 중요부분에서 잘 복원되었다.

연구과정에서 개발된 프로그램은 아직 복원 속도에서 최적화되지 않아, 되풀이 과정을 50회 하는데 걸리는 시간은 2~3초 정도로 비교적 길다.

IV. 결 론

지속시간이 펨토초 수준인 극초단 빛펄스의 전기장 및 위상의 분포를 잴 수 있는 이차조화파 발생 프로그램 장치와 소프트웨어를 함께 개발하고, 분산매질을 지나기 전후의 빛펄스의 측정 결과를 널리 쓰이는 상품화된 장치와 비교해서 장치의 성능을 시험하였다. 측정 결과로부터 복원한 빛펄스는 자체 모순이 없이 빛펄스를 복원해내는 것을 확인하였고, 양의 새움음이 있는 매질을 지난 결과로부터 빛펄스의 시간 반전에 대한 애매함을 없앨 수 있었다. 빛펄스 복원의 신뢰성과 속도를 높이고자 PCGP 알고리즘에 프로그램 궤적으로부터 얻을 수 있는 주파수 한계값, 시간지연 한계값 그리고 이차조화파 분광분포를 적용함으로써 빛펄스 복원이 더 안정적이고 빠르게 이루어짐을 확인하였다. 그 결과 약 50회의 되풀이 과정만으로 3%의 오차 이내에서 빛펄스를 복원해낼 수 있었다. 앞으로 극초단 펄스 측정에 관한 연구를 수행하는 연구자가 필요한 경우 요청하면 본 연구 과정에서 개발된 펄스복원 프로그램을 제공할 수 있다.

감사의 글

※ 이 연구는 2002년도 학술진흥재단의 지원[KRF-2002-C0003]을 받아 수행되었음

참고문헌

- [1] C. Rulliere ed., *Femtosecond pulses: Principles and Experiments* (Springer Verlag, Berlin, 1998).
- [2] T. Kaliya, F. Saito, O. Wada, H. Yajima eds., *Femtosecond Technology: From Basic Research to Application Prospects* (Springer Verlag, Berlin, 1999).
- [3] <http://www.festa.or.jp/>.
- [4] <http://mulli2.kps.or.kr/~pht/11-3/020321.htm/>.
- [5] <http://147.46.43.65/index.html/>.
- [6] <http://chem.yonsei.ac.kr/~CUOCC/>.
- [7] <http://apri.kjist.ac.kr/>.
- [8] K. Naganuma, K. Mogi, and H. Yamada, "General Method for Ultrashort Light Pulse Chirp Measurement," *IEEE J. Quantum Electron.*, 25, pp. 1225-1233, 1989.
- [9] J.-H. Chung and A. M. Weiner, "Ambiguity of Ultrashort Pulse Shapes Retrieved from the Intensity Autocorrelation and the Power Spectrum," 7, pp. 656-666, 2001.
- [10] K. W. DeLong, R. Trebino, J. Hunter, and W. E. White, "Frequency-resolved optical gating with the use of second-harmonic generation," *J. Opt. Soc. Am. B* 11, pp. 2206-2215,

- 1994.
- [11] J. Paye, "How to Measure the Amplitude and Phase of an Ultrashort Light Pulse with an Autocorrelator and a Spectrometer," *IEEE J. Quantum Electron.*, 30, pp. 2693-2697, 1994.
- [12] K. H. Hong, Y. H. Cha, C. H. Nam, and J. D. Park, "Temporal Characterization of a Femtosecond Terawatt Ti:Sapphire Laser Using Frequency-Resolved Optical Gating," *JKPS*, 33, pp. 315-319, 1998.
- [13] C. Iaconis and I. A. Walmsley, "Self-Referencing Spectral Interferometry for Measuring Ultrashort Optical Pulses," *IEEE J. Quantum Electron.*, 35, pp. 501-509, 1999; I. A. Walmsley, "Measuring Ultrashort Optical Pulses," *Opt. Photon. News*, April, pp. 28-33 (1999).
- [14] J. W. Nicholson, M. Mero, J. Jaspara, W. Rudolph, F. G. Omenetto, and A. J. Taulor, "Full-field characterization of femtosecond pulses by spectrum and cross-correlation measurements," *Opt. Lett.* 24, pp. 1774-1776, 1999; J. W. Nicholson, J. Jaspara, and W. Rudolph, "Unbalanced third-order correlations for full characterization of femtosecond pulses," *Opt. Lett.* 25, pp. 1801-1803, 2000; J. W. Nicholson and W. Rudolph, "Noise sensitivity and accuracy of femtosecond pulse retrieval by phase and intensity from correlation and spectrum only (PICASO)," *J. Opt. Soc. Am. B*, pp. 330-339, 2002.
- [15] P. O'Shea, M. Kimmel, X. Gu, and R. Trebino, "Highly simplified device for ultrashort-pulse measurement," *Opt. Lett.* 26, pp. 932-934, 2001.
- [16] R. Trebino, K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, J. N. Sweetser, M. A. Krumbügel, B. A. Richman, and D. J. Kane, "Measuring ultrashort laser pulses in the time-frequency domain using frequency-resolved optical gating," *Rev. Sci. Instrum.* 68, pp. 3277-3295, 1997.
- [17] <http://www.swampoptics.com/> (Swamp Optics 회사의 인터넷 홈페이지).
- [18] 프로그램 궤적으로부터 빛펄스를 찾아주는 소프트웨어 (FROG 3.0.x)가 현재 상품화(<http://www.femtosoftware.biz>)되어 있다(\$495). 그러나 개선의 여지는 있고, 프로그램의 세세한 부분까지 조작하려면 소스코드 수준의 작업이 요구되므로 프로그램의 개발이 필요하다.
- [19] D. J. Kane, "Recent Progress Toward Real-Time Measurement of Ultrashort Laser Pulses," *IEEE J. Quantum Electron.*, 35, pp. 421-431, 1999.
- [20] R. Trebino, *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*, Chap. 7 (Kluwer Academic Publishers, 2000).
- [21] K. W. DeLong and R. Trebino, "Improved ultrashort pulse-retrieval algorithm for frequency-resolved optical gating," *J. Opt. Soc. Am. A*, 11, pp. 2429-2437, 1994.

Development of FROG Hardware and Software System for the Measurement of Femto-Seconds Ultrashort Laser Pulses

B.-K. Yang and J. S. Kim[†]

Institute of Photonics & Information Technology, Chonbuk National University, Chonju 561-756, KOREA

[†] E-mail: jin@chonbuk.ac.kr

(Received March 15, 2004, Revised manuscript May 20, 2004)

A Second Harmonic Generation Frequency Resolved Optical Gating(SHG FROG) system was developed. Its performance test shows that it is capable of accurately measuring the temporal evolution of the electric field, both amplitude and phase, of femtosecond light pulses. For the retrieval of the temporal evolution of light pulses from their spectrograms obtained by using the FROG system, Principal Components Generalized Projection(PCGP) algorithm is used and in addition we used additional constraints of second-harmonic spectrum, marginals in frequency and time-delay of the spectrogram. Such modification of the software brings about significant improvement in speed and stability of the pulse retrieval process.

OCIS Code : 320.7160.