

## 펨토초 펄스 레이저를 이용한 3차원 물체 측정

고두성 · 조형준 · 최치규 · 유영훈  
제주대학교 물리학과, 제주 690-756

### 요 약

펨토초 펄스 레이저는 시간과 공간적으로 국한되어 있어 펄스의 비행 시간(time-of-flight)을 이용하여 두께 차가 있는 3차원 물체의 상대적인 두께 차 그리고 모양과 같은 공간 축에 대한 정보 측정이 용이하고, 빔을 주사하지 않고도 빔 크기 내의 3차원 측정이 가능하다. 본 연구에서는 펄스레이저와 펄스 비행시간 측정을 이용하여 두께 차가 있는 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 측정하였다.

### I. 서 론

펨토초( $10^{-15}$ s) 펄스 레이저는 펄스 비행 시간 측정을 이용하여 의료학 분야에서 세포의 입체적 모양을 관찰하거나 반도체 분야에서 전자-홀간의 동력에 대한 연구에 응용될 뿐 아니라 많은 분야에서 연구가 진행되고 있다.<sup>[1-3]</sup>

기존의 주사방식과 펄스 레이저를 이용하면 3차원 측정이 가능하나 시료의 위치를 변화시켜 시료에서 투과 또는 반사되는 빛의 기준경로가 같은 위치를 측정하여 길이를 알아내는 방법으로 이는 펄스 레이저의 특성 중 하나인 공간정보를 이용하는 것이다. 그러나 비행 시간과 펄스 레이저의 특징인 공간국한을 이용하면 시료의 이동이나, 펄스의 주사방법을 이용하지 않아도 3차원 측정이 가능하다.

펨토초 펄스 레이저의 비행 시간 정보를 이용하기 위해서는, 펄스의 시간 정보를 갖는 반

치폭 측정이 필요하다. 이를 위하여 간섭계와 비선형 물질의 비선형 효과를 이용하면 반치폭 측정이 가능하다.<sup>[4-7]</sup>

본 연구에서는 비선형 물질 BBO(Beta Barium Borate)와 간섭계를 사용하여 펄스 레이저의 반치폭을 측정하였고, 중심파장이 800 nm 이며, 반치폭이 100펨토초인 모드락된 펄스 레이저와 시간 지연 경로를 이용하여 비주사 방식으로 두께 차가 있는 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 측정하였다.

### II. 이 론

#### 1. 극초단 펄스 모양

$z$ 축으로 진행하는 펨토초 펄스는 Gaussian 포락선으로 조정된 전기장이고 다음 식과 같다.<sup>[8-9]</sup>

$$E(t, z) = Re \left[ \hat{\epsilon} E_0 \exp \left( -\frac{(t - \frac{nz}{c})^2}{\tau^2} \right) \exp(i(\omega_0 t - kz)) \right] \quad (1)$$

여기서,  $\hat{\epsilon}$ 는 편광 벡터,  $k$ 는 파수,  $E_0$ 는 진폭,  $\omega_0$ 는 각주파수,  $\tau$ 는 펄스의 반치폭이다. 편광을 고려하지 않으면 식(1)은 다음 식 같다.

$$E(t) = Re \left[ E_0 \exp \left( -\frac{t^2}{\tau^2} \right) \exp(i\omega_0 t) \right] \quad (2)$$

## 2. 자체 상관 함수

펄트초 시간 영역에 관한 시간 측정의 일반적인 방법은 간섭계를 이용한 자체 상관 함수 측정방법이다.<sup>[6]</sup>

두 펄스의 간섭에 의한 비선형 물질에서의 자체 상관 함수를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{2\omega}(a) = \frac{1}{T} \int_{-T}^T [|E(t-a) + E(t)|^2]^2 dt \quad (3)$$

여기서,  $T$ 는 검출기의 응답 시간,  $a$ 는 간섭계 두 경로차에 의한 펄스의 시간차이다.

복소수 형식을 이용하면 자체상관함수는 다음 식과 같다

$$\begin{aligned} G_{2\omega}(a) = & \frac{1}{T} \int_{-T}^T [(E_0 \exp(-\frac{(t-a)^2}{\tau^2}) \cos \omega_0(t-a)) \\ & + E_0 \exp(-\frac{t^2}{\tau^2}) \cos \omega_0 t]^2 \\ & + (E_0 \exp(-\frac{(t-a)^2}{\tau^2}) \sin \omega_0(t-a)) \\ & + E_0 \exp(-\frac{t^2}{\tau^2}) \sin \omega_0 t]^2 dt \end{aligned} \quad (4)$$

이와 같은 자체 상관 함수의  $2\omega$  항과 비선형 매질을 이용하면 레이저 펄스의 반치폭뿐

만 아니라 자체 상관 함수의 최대치를 측정함으로써 경로차를 측정할 수 있다.

## II. 실험

### 1. 실험방법 및 장치

펄스 레이저를 이용한 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 측정하기 위한 실험 개략도는 그림 1과 같다.

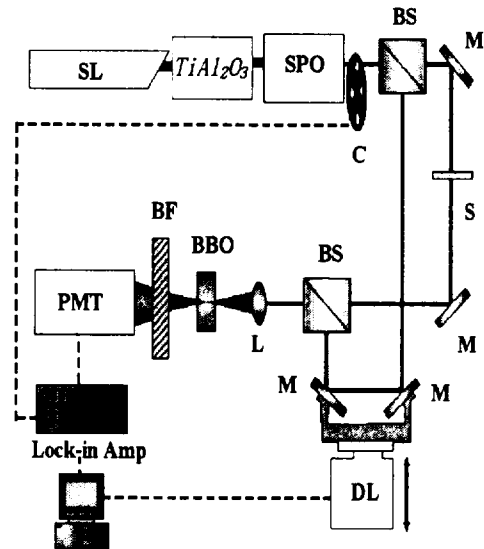


그림 1. 실험 개략도, SL: Semiconductor Laser,  $TiAl_2O_3$ : Titanium sapphire Laser, SPO: Short Pulse Option, C: Chopper, BS: Beam Splitter, M: Mirror, S: Sample, DL: Delay Line, L: Lens, BF: Bandpass-Filter, PMT: Photo-Multiplier Tube.

타이타늄 사파이어를 이용한 중심파장 800 nm 인 펄트초 펄스 레이저를 발생시키기 위하여 펌프빔으로는 파장 532 nm 인 반도체 레이저를 사용하였고, 펄스 레이저의 펄스 넓이를 줄이기 위해 SPO(Short Pulse Option)

를 이용하여 100펄토초로 줄였다. 두 펄스의 시간차를 조절할 수 있는 시간 지연 경로(DL)를 설치하였다. BBO 결정은 제 2고조파 신호를 발생시켜 반치폭을 측정하기 위한 것이고, 광 검출기로는 PMT(Photo Multiplier Tube)를 사용하였다. PMT에서 검출된 신호의 신호대 잡음비를 증가시키기 위하여 광 chopper와 lock-in amplifier를 사용하였다. BBO 결정에서 나온 빔이 기준 펄스(800 nm)와 제 2고조파 펄스(400 nm)가 동시에 발생하므로 800 nm 를 제거할 수 있고 특정 파장 영역인 400 nm 만 투과할 수 있는 필터를 사용하였다.

### III. 결과 및 논의

반치폭을 측정하기 위하여 레이저에서 나온 펄스 빔을 광 분할기를 이용하여 두 개의 경로 나눈다. 간섭계에서 한 경로를 고정시킨 후 다른 경로의 길이를 변화시켜 제 2고조파를 발생시킬 수 있는 비선형 매질에 입사시켰다.

이때 두 경로의 경로차에 의해서 두 펄스의 간섭정도가 다르므로 두 펄스의 간섭에 의한 자체 상관 함수 변화를 측정할 수 있었다. 그림 2는 제 2고조파를 이용하여 측정된 자체 상관 함수이다.

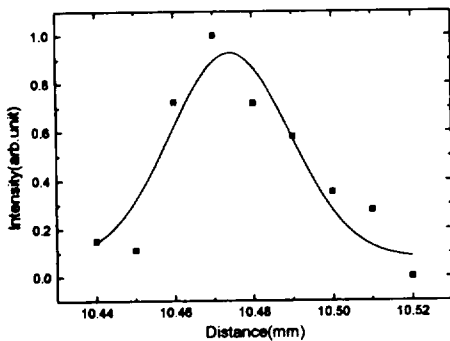


그림 2 BBO 매질에 의한 두 펄스의 간섭 세기.

그림 2에서 ■은 실험 값이고, 실선은 Gaussian 함수를 이용하여 fitting한 것이며, 펄스 레이저의 반치폭은 30.28  $\mu\text{m}$ 로 측정 되었다. 이로부터 사용된 펄스레이저의 반치폭은 100.93 fs이다. 그림에서 보는 바와 같이 Gaussian 최대점은 거리 10.47 mm 에서 나타났고, 이런 최대점의 이동정도를 가지고 시료의 두께를 측정할 수 있다.

시료(유리)의 두께를 측정하기 위하여 고정된 경로에 유리를 놓고, 다른 경로의 길이를 변화시켜 유리의 두께를 측정하였다. 펄스 레이저의 파장 800 nm 에서 유리의 굴절률은 1.38이다. 그리고 공기의 굴절률은 1이므로 유리의 굴절률과 공기의 굴절률의 차이는 0.38이다.

그림 3은 한 경로에 두께가 150  $\mu\text{m}$ 인 유리를 놓고 측정한 결과이다

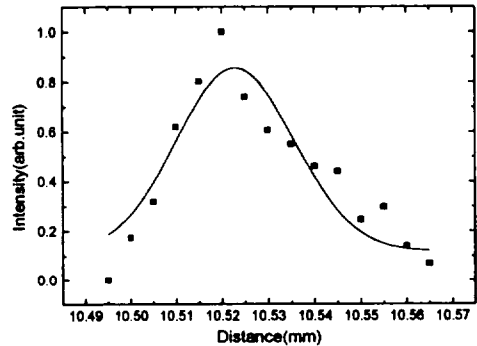


그림 3. 두께가 150  $\mu\text{m}$  인 유리를 통과한 빔의 세기.

그림 3에서 실선은 거리 10.52 mm 에서 Gaussian 최대점을 갖는다. 그림 2와 비교하면 Gaussian 최대점이 오른쪽으로 49.50  $\mu\text{m}$  (165.01 fs)만큼 더 이동되었고, Gaussian 최대점의 이동은 유리의 두께에 의한 두 펄스의 경로차로 인해 생겼다는 것을 알 수 있었고, 이로부터 유리의 두께가 약 130.27  $\mu\text{m}$  [ $49.50 \mu\text{m} / (n_{\text{유리}} - n_{\text{공기}})$ ]을 알 수 있었다. 이때 측정된 유리의 두께와 마이크로미터로 측정한

유리의 두께  $150 \mu\text{m}$ 와 약  $19.73 \mu\text{m}$ 의 차이를 보이고 있다. 반치폭은  $37.83 \mu\text{m}$  ( $126.1 \text{fs}$ )이고, 그림 2보다  $7.55 \mu\text{m}$  ( $25.1 \text{fs}$ )더 넓어졌다. 반치폭이 넓어진 이유는 펄스 레이저 빔이 유리를 통과할 때 굴절률에 의하여 분산이 일어났기 때문이다.

펄스 레이저 빔을 이용하여 두께 차를 갖고 있는 유리의 상대적인 두께 차를 측정하기 위하여 레이저에서 나온 빔을 광 분할기로 두 개의 펄스로 나눈 후 고정된 경로에 유리를 놓고, 다른 경로의 길이를 변화시켜 유리의 상대적인 두께 차에 대해 비주사방식을 이용하여 측정하였다. 펄스 빔은 계단모양의 두께 차가 있는 유리의 경계부분에 입사시켰다. 이와 같은 방법을 이용하여 간섭계에서 한쪽 경로에 두께가 각각  $150 \mu\text{m}$ 와  $300 \mu\text{m}$ 인 계단 형태의 유리를 놓고 상대적인 두께 차를 측정한 자체 상관 함수를 그림 4에 나타내었다.

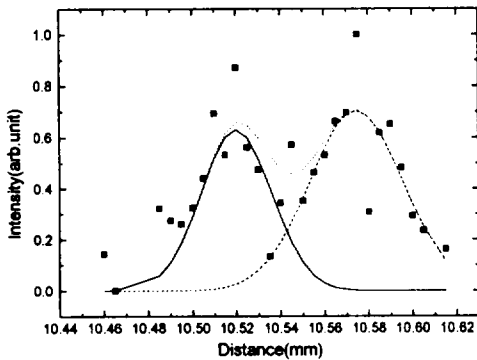


그림 4. 계단 모양의 두께 차를 갖는 유리를 통과한 빔의 세기.

이 그림에서 실선과 대시선의 Gaussian 모양은 유리의 경계부분에 입사된 두 개의 펄스 빔이 유리의 상대적인 두께 차에 의해서 경로 차가 생겨 발생한 것이다. 실선( 유리두께  $150 \mu\text{m}$ )은 거리  $10.52 \text{mm}$ 에서 대시선( 유리두께  $300 \mu\text{m}$ )은 거리  $10.57 \text{mm}$ 에서 Gaussian 최대점을 갖는다. 이것을 그림 2와

비교하면 Gaussian 최대점이 실선은 오른쪽으로  $46.64 \mu\text{m}$  ( $155.46 \text{fs}$ )이동하였고, 대시선은  $99.18 \mu\text{m}$  ( $330.59 \text{fs}$ )이동하였다. 그림 4에서 두 개의 Gaussian 최대점의 이동은 유리의 두께 때문에 생겼다는 것을 알 수 있었고, 이것으로부터 유리의 두께가 실선은  $123 \mu\text{m}$  [ $(46.63 \mu\text{m}/(n_{\text{유리}} - n_{\text{공기}}))$ ]이고, 대시선은 약  $261 \mu\text{m}$  [ $(99.17 \mu\text{m}/(n_{\text{유리}} - n_{\text{공기}}))$ ]임을 알 수 있었다. 이때 측정된 유리의 두께가 마이크로미터로 측정한 유리의 두께  $150 \mu\text{m}$ ,  $300 \mu\text{m}$ 와 각각  $27 \mu\text{m}$ ,  $39 \mu\text{m}$  차이를 보이고 있다. 이 때 유리의 상대적인 두께 차는 약  $138 \mu\text{m}$  [ $261 \mu\text{m}(\text{대시선}) - 123 \mu\text{m}(\text{실선})$ ]이고 이것은 마이크로미터로 측정한 상대적인 두께 차  $150 \mu\text{m}$ 와 약  $12 \mu\text{m}$  차이를 보이고 있으나, 펄스 레이저를 이용하여 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 비주사방식으로 측정 가능함을 알 수 있었다. 이 그림으로부터 측정된 두 펄스의 반치폭은 실선인 경우  $36.12 \mu\text{m}$ 이 되었고, 대시선인 경우  $43.67 \mu\text{m}$ 이 되었다. 이와 같은 반치폭의 차이 즉, 펄스 퍼짐의 차이를 보이는 것은 펄스 레이저 빔이 두께 차가 있는 유리의 경계부분을 통과하면서 유리의 굴절률에 의한 분산정도가 다르기 때문이다.

#### IV. 결 론

공간에 관한 정보만을 갖고 있는 연속파 레이저를 이용하여 계단모양의 두께 차가 있는 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 측정할 때 주사방식을 사용하므로 측정이 복잡해지고 측정된 값을 시간으로 변환시켜야 하는 어려움이 따른다.

본 연구에서는 이런 문제점들을 보완하고자 시간과 공간적으로 국한되어 있는 펄스 레이저를 이용하여 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 비주사방식으로 측정하였다. 펄스 레이

저의 시간 정보를 나타내는 반치폭을 측정하기 위해 비선형매질인 BBO와 간섭계를 구성하였으며, 측정된 레이저 펄스의 반치폭은 100.93 fs 이었다. 측정된 Gaussian 모양의 최대점 위치를 기준으로 하여 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 측정하였다. 계단모양의 두께 차이가 있는 3차원 물체의 상대적인 두께 차를 비주사방식으로 측정한 결과 두께 차 138  $\mu\text{m}$  ( 460 fs )를 얻었다. 이때 측정된 결과는 마이크로미터로 측정한 3차원 물체의 상대적인 두께차이 150  $\mu\text{m}$  ( 500 fs )와 12  $\mu\text{m}$  ( 40 fs )의 차이를 보이고 있으나 비행 시간 정보를 갖고 있는 펄스 레이저를 이용하여 비주사방식으로 3차원 물체의 상대적인 두께 차 측정을 할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] J. G. Fujimoto, S. De Silvestri, E. P. Ippen, C. A. Puliafito, R. Margolis and A. Oseroff. *Opt. Lett.*, **3**. 150. 1986.
- [2] B. Bouma, G. J. Tearney, S. A. Boppart and M. R. Hee. High-resolution optical coherence tomographic imaging using a mode-locked  $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$  laser source. 1995.
- [3] T. D. Donnelly and C. H. Grossman. *Am. J. Phys.*, **66**. 697. 1998.
- [4] F. Zernicke. *J. Opt. Soc. Am.*, **54**. 1215. 1964.
- [5] M. Choy and R. L. Byer. *Phys. Rev.* **B14**. 1693. 1976.
- [6] J. C. Diels, 'Ultra-short laser pulse phenomena', Academic Press. 1996.
- [7] Jing-yuan Zhang, Jungn Y. Huang, H. Wang, K. S. Wong and G. K. Wong. *J. Opt. Soc. Am.*, **B15**. 200. 1998.
- [8] C. Rulliere, 'Femtosecond laser pulses', Springer. 1998.
- [1] J. G. Fujimoto, S. De Silvestri, E. P. Ippen, C. A. Puliafito, R. Margolis and

## 3 Dimensional Measurement using Femtosecond Pulse Laser

Doo Sung Ko, Hyoun Jun Cho, Chi Kyu Choi and Young Hun Yu  
*Department of Physics , Cheju National University, Jeju 690-756, KOREA*

We have measured the relative thickness difference of 3 dimensional material ,which has a different thickness, by means of time flight method with femto-second laser pulse. We have found that 3 dimensional measurement without scanning is possible by time of flight method. The measuring accuracy depends on the pulse width and pulse dispersion by material.