

## 광열/광음 기법에 의한 나노초 폭발적 기화 과정 분석

김동식<sup>†</sup> · 박희권<sup>\*</sup> · C. P. Grigoropoulos<sup>\*\*</sup> · 최선락<sup>\*\*\*</sup>

(2002년 11월 28일 접수, 2003년 3월 28일 심사완료)

### Analysis of Nanosecond Explosive Vaporization Process by Photothermal/Photoacoustic Methods

Dongsik Kim, Hee K. Park, Costas P. Grigoropoulos and Sun R. Choi

**Key Words :** Photothermal Reflectance Method(광열반사율측정법), Photoacoustic Optical Deflection Method(광음굴절법), Vaporization(기화), Pulsed Laser(펄스레이저)

#### Abstract

This paper introduces optical methods for in-situ measurement of surface temperature and pressure transient in thermal processes having nanosecond time scales. In the temperature measurement, a p-Si thin film whose refractive index is calibrated as a function of temperature is embedded beneath the sample surface and the photothermal reflectance is monitored for estimating the surface temperature. The pressure transients are measured using the photoacoustic optical deflection method. The experimental technique is used to analyze the nanosecond laser induced vaporization process that is central to numerous engineering and bio-medical applications. Based on the experimental results, discussions are made on the experimental technique and the physical mechanisms of laser-driven explosive vaporization phenomena.

기호설명	
$C_p$ : 정압 비열, J/kgK	$k_i, k_{i+1}$ : $i, i+1$ 층에서의 열전도도, W/mK
$c$ : 음속, m/s	$k_{p-Si}$ : p-Si의 흡수계수
$d_i$ : 각 층의 두께, m	$L$ : 탐시광의 초점과 knife edge 사이의 거리, m
$E_a$ : 음파의 단위 면적당 에너지, J/m <sup>2</sup>	$l$ : 광음파와 탐시광의 작용거리, m
$F$ : 레이저 플루언스 (laser fluence), J/m <sup>2</sup>	$n$ : 복소수 굴절률
$f$ : 초점거리, m	$n_0, \tilde{n}_i$ : 평형상태와 각 층에서의 복소수 굴절률
$I_{exc}$ : 레이저빔의 강도, J/m <sup>2</sup> s	$n_{quartz}$ : 수정의 굴절계수
$i$ : 허수단위, $\sqrt{-1}$	$n_{p-Si}$ : p-Si의 굴절계수
$k$ : 열전도도, W/mK	$P$ : 음파의 압력, Pa
	$R_{exc}$ : 레이저빔의 반사율
	$r$ : 위치, m
	$T$ : 온도, °C
	$T_x, T_0$ : 외부 환경과 기준점에서의 온도, °C
	$t$ : 시간, s
	$t_p$ : 레이저 강도 상승 시간, s
	$t_f$ : 레이저 강도 하강 시간, s
	$V, V_0$ : 측정된 광다이오드 신호와 기준

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과  
E-mail: dskim87@postech.ac.kr  
TEL: (054) 279-2179 FAX: (054) 279-3199

<sup>\*</sup> IBM, Storage Division, San Jose, USA  
<sup>\*\*</sup> Department of Mechanical Engineering, University of California at Berkeley

<sup>\*\*\*</sup> 포항공과대학교 기계공학과

	신호, V
$w_i$	: 탐사광 (probe beam)의 반지름, m
$w_0$	: 초점거리에서의 빔의 반지름, m
$x$	: 위치, m

그리스문자

$\alpha$	: 광침투계수, $m^{-1}$
$\varphi$	: 굴절각, °
$\lambda$	: 빛의 파장, m
$\rho$	: 밀도, $kg/m^3$

1. 서 론

나노초 이하의 짧은 거동을 가지는 급속한 열 공정에서 온도, 압력을 실시간 계측하는 것은 공정의 해석을 위해 대단히 중요하다. 특히, 나노초 이하의 짧은 레이저 펄스와 액체의 상호작용 현상을 이해하는 것은 습식 레이저 표면세척과 같은 표면 가공 분야와 레이저 수술과 같은 생의학 분야에 있어서 필수적이다.<sup>(1-6)</sup> 습식레이저세척 (steam laser cleaning) 공정에서 나노초 폭발적 기화 (explosive vaporization) 과정은 액체의 과열도 (degree of superheat) 와 유체 내의 압력과 관련되어 있다.<sup>(7,8)</sup> 또한 생체 조직의 레이저 처리에 있어서도 온도 상승과 기포의 성장과 소멸 시 발생하는 압력파가 인접 세포 손상과 관련되어 있음이 알려지면서 펄스 레이저에 의한 나노초 폭발적 기화 과정을 해석하려는 다양한 연구가 진행되고 있다. 그러나 나노초 폭발적 기화 과정의 해석에서 온도, 압력과 같은 열역학적 변수의 측정이 필수적임에도 불구하고 온도와 압력을 실시간으로 측정한 실험결과는 거의 알려진 것이 없다. 따라서 본 연구에서는 급속히 가열되는 시편 표면의 온도와 유체 중 압력파를 나노초 시간 정밀도를 가지고 계측할 수 있는 실험 장치를 구성하고, 레이저 펄스에 의한 나노초 폭발적 기화 과정을 실시간으로 계측하였다. 온도 계측을 위해서는 기존에 알려진 박막 온도센서 삽입에 의한 광열반사율 (photothermal reflectance) 측정기법을 이용하였고, 압력 계측을 위해서는 광음굴절법 (photoacoustic optical deflection method)을 적용하여 계측하였다. 광반사율 (또는 투과율)로부터 온도를 계측하는 방법은 이미 타 연구에서 이용된 적이 있으나 나노초 폭발적 기화 과정에서는 기포에 의한 빛의 산란 분

제 때문에 적용된 적이 없으며 근래에야 Park 등 (1996)에 의해 광반사율을 이용한 온도 계측기법이 제안되었다.<sup>(9)</sup> 마찬가지로 빛의 굴절을 이용하여 압력을 측정하는 방법도 광음분광분석 (photoacoustic spectroscopy) 연구와 관련하여 과거에 이미 개념이 확립되었으나 폭발적 기화 과정의 연구에는 적용된 사례가 없다. 따라서 본 연구는 비접촉식 광학 기법에 의한 온도, 압력 측정 장치를 구성하고, 이를 나노초 폭발적 기화과정에 적용하는 것을 목적으로 한다. 특히,  $\sim 10^9$  K/s 정도의 온도상승률을 수반하는 나노초 폭발적 기화 과정에서 액체의 과열도와 압력파를 정량적으로 동시에 계측하여 액상 레이저세척과 같은 레이저 표면 가공공정의 이론 해석에 필요한 실험자료를 제공하고자 한다.

펄스 레이저에 의해 생성되는 온도와 압력파를 측정하기 위한 다양한 방법들이 제시되어왔다. 온도 측정을 위해서는 열전대, 열전결정, NiSi 과 같은 저항체를 이용한 방법들이 과거 제시 되었으며 몇몇 성공적인 측정 결과가 보고 되었다.<sup>(10-12)</sup> 하지만 위의 계측 방법들은 큰 시상수로 인한 시간 정밀도 제약, 저항체와 금속 박막의 절연, 공정상의 복잡성과 같은 문제점을 수반하였다. 따라서 광학적 측정법을 개발하려는 시도가 있었고 본 연구에서는 Jellison 등에 의해 처음 제안된 광열 반사율 측정법을 나노초 폭발적 기화 과정에 적용하였다.<sup>(13,14)</sup> 압력 측정을 위해서는, 수중청음기 (hydrophone) 나 압전센서를 이용한 측정법이 보고 되었다. 그러나 위 계측 방법들은 센서의 교정이 힘들고 대역폭의 제한 때문에 적용이 힘든 경우가 많고 적절한 음향학적 임피던스 정합이 이루어지지 않는 경우, 압력이 부정확하게 (주로 실제보다 작게) 측정되었다.<sup>(15,16)</sup> 특히 나노초 폭발적 기화 과정의 해석을 위해서는 고주파 성분의 감쇠가 일어나지 않도록 압력센서를 시편에 근접한 위치에 삽입하여야 하므로, 압력센서가 측정하고자 하는 물리적 현상에 영향을 준다. 그 외 광학적인 계측 방법들로는 충격파의 속도를 측정하여 압력을 추산하거나 빛의 간섭 현상으로부터 압력을 측정하는 방법이 있으나 실험 결과의 해석과 압력의 정량화에 어려움이 있었다.<sup>(17-20)</sup> Do 등 (1993)은 광음 굴절법을 이용하여 나노초 레이저에 압력 발생을 분석한 바 있으나 정량적인 측정은 이루어지지 않았다.<sup>(21)</sup> 따라서 본 연구에서는 광음굴절법을 나노초 폭발적 기화 과정에 적용하여 압력파를 정량적으로 측정하였다.

## 2. 이론

본 연구에 이용된 온도 및 압력 측정 장치의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있으며 측정 원리는 아래 서술된 바와 같다.

### 2.1 온도 측정

본 연구에서는 액체에 잠긴 시편이 나노초 엑시머레이저 (excimer laser)에 의해 가열될 때, 시편의 후방에서 HeNe 레이저의 반사율 변화를 측정하여 고액 계면의 온도를 예측한다. 엑시머레이저 빔의 직경은 약 1 cm인 반면 광학적 침투 깊이와 열침투 깊이는 각각 수 nm와 수  $\mu\text{m}$ 에 불과하므로 시편 내부의 온도장은 아래와 같은 일차원 열전도 방정식을 가정하고 계산할 수 있다.

$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + (1 - R_{\text{exc}}) I_{\text{exc}}(t) \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_\infty \quad (2a)$$

$$T(x, t)_{|_i} = T(x, t)_{|_{i+1}} \quad (2b)$$

$$k_i \frac{\partial T(x, t)_{|_i}}{\partial x} = k_{i+1} \frac{\partial T(x, t)_{|_{i+1}}}{\partial x} \quad (2c)$$

$$T(\infty, t) = T(-\infty, t) = T_\infty \quad (2d)$$

위 식에서  $I_{\text{exc}}(t)$ 는 조사되는 레이저빔의 강도로서 다음과 같이 시간의 함수로 표현된다.

$$I_{\text{exc}}(t) = \begin{cases} \frac{2F}{t_i t_p} t & (0 < t < t_p) \\ \frac{2F(t_i - t)}{t_i(t_i - t_p)} & (t_p < t < t_i) \\ 0 & (t_i < t) \end{cases} \quad (3)$$

( $t_p = 17 \text{ ns}$ ,  $t_i = 48 \text{ ns}$ )

시편 내 각 층의 굴절율을 알면 특성투과행렬 (characteristic transmission matrix) 기법으로 HeNe 레이저의 반사율을 계산할 수 있다.<sup>(22)</sup> 균일한 물성을 갖는 각 층의 특성행렬은 아래와 같이 주어지며 반사율을 결정하는 전체 특성투과행렬은 각 특성행렬의 곱으로 표현된다.

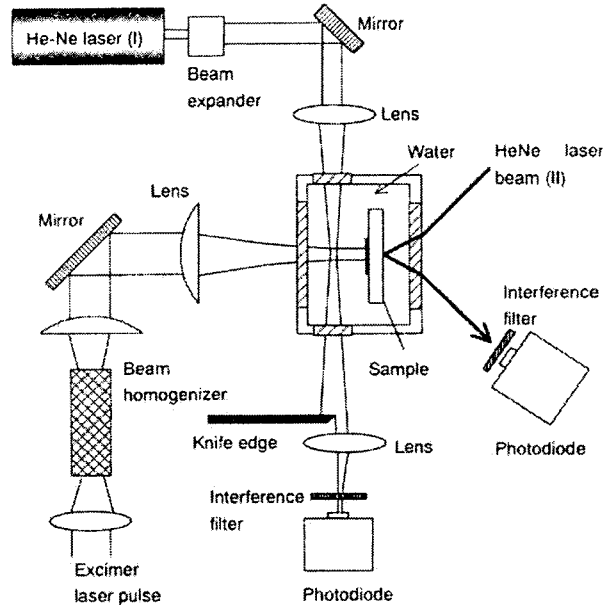


Fig. 1 Schematic diagrams of the experimental setup with the optical reflectance probe and the photoacoustic deflection probe. The diameter of the deflection probe beam is exaggerated

$$M_i = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi\tilde{n}_i d_i}{\lambda}\right) & \frac{i}{\tilde{n}_i} \sin\left(\frac{2\pi\tilde{n}_i d_i}{\lambda}\right) \\ i\tilde{n}_i \sin\left(\frac{2\pi\tilde{n}_i d_i}{\lambda}\right) & \cos\left(\frac{2\pi\tilde{n}_i d_i}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

이러한 계산에서 온도에 따른 굴절율 변화가 큰 경우에는 온도에 의한 비선형 효과를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 Jacobssoon (1965)에 의해 제안된 바와 같이 각 층이 동일한 물질로 이루어진 다수의 미세한 층으로 분할되어 있고 각 미세한 층의 물성은 그 위치에서의 온도에 대응하여 결정되는 것으로 가정하여 반사율을 계산하였다.<sup>(23)</sup>

앞서 서술한 방식으로 수치계산을 수행하면 고액 계면에서의 온도와 시편 후방에서의 반사율과의 관계를 구할 수 있다. 따라서 주어진 레이저 플루언스에서 수치해석을 통해 얻어진 표면온도-반사율과의 관계식을 이용하면 실험에서 측정된 반사율로부터 계면 온도를 예측할 수 있다. 이러한 역해석 기법은 Park 등이 제안한 것과 동일한 방법으로서 참고문헌 [9]에 자세한 사항이 기술되어 있다.

### 2.2 압력 측정

광음굴절법은 압력파에 의해 유체에 굴절율 구

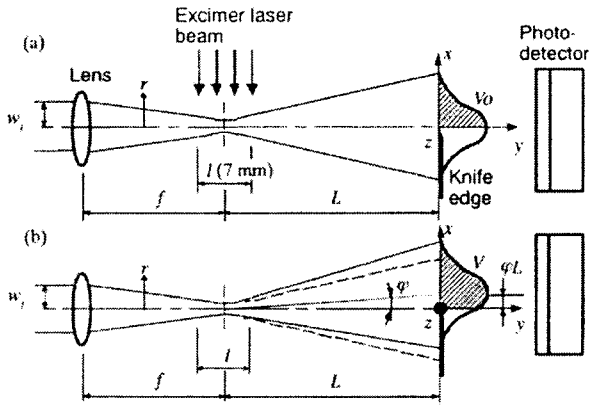


Fig. 2 Geometry of (a) undeflected and (b) deflected probe beam with Gaussian intensity profile

배가 형성될 때 생기는 빛의 굴절 현상을 이용하여 압력파를 측정하는 기법으로서 압력 계측이나 화학분석에 이용되어 왔다.<sup>(24,25)</sup> 탐사광의 지름이 압력파의 파장에 비해 훨씬 작을 경우, 굴절각은 다음과 같이 근사적으로 계산된다.<sup>(25)</sup>

$$\varphi(l) = \frac{l}{n_0} \frac{\partial n}{\partial r} \quad (5)$$

본 연구에서 측정하고자 하는 압력파의 파장이 약 300  $\mu\text{m}$  로 추정되고 탐사광의 지름은 25  $\mu\text{m}$  이므로 위의 식을 이용할 수 있다. 탐사광이 가우시안 에너지 분포를 갖는 경우, Fig. 2 에서와 같이 knife edge 를 통과한 지점에서 측정된 광다이오드 신호와 굴절각과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \text{erf} \left( \sqrt{2} \varphi(l) \frac{\pi w_0}{\lambda} \right) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 결합하면 시간에 따른 압력 변화를 광다이오드 신호의 함수로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\left( \frac{\partial P}{\partial t} \right)_{r=0} = \frac{\lambda c n_0}{\sqrt{2} \pi w_0 l \left( \frac{\partial n}{\partial P} \right)_{r=0}} \text{erf}^{-1} \left( \frac{\Delta V}{V} \right) \quad (7)$$

물의  $\frac{\partial n}{\partial P}$  값은 파장 632.8 nm 에서  $1.5 \times 10^{-4} \text{ Mpa}^{-1}$  이고 위식을 적분하면 시간에 따른 압력을 얻을 수 있다.<sup>(26)</sup> 물속에서 열침투 길이는 약 1  $\mu\text{m}$  이고 탐사광은 시편의 표면으로부터 수 mm 떨어진 지

점을 통과하므로 광열굴절 (photothermal deflection) 효과는 본 실험에서 무시할 수 있다.

### 3. 실험

Fig. 1 에 나타난 것과 같이 실험은 KrF excimer laser ( $\lambda = 248 \text{ nm}$ , pulse width = 24 ns FWHM)를 이용하여 수행하였다. 엑시머레이저빔은 터널형 난반사 장치를 투과하면서 에너지 분포가 균일하게 된 후 deionized 처리된 물속에 잠긴 시편에 조사된다. 실험에 이용된 시편은 0.5 mm 두께의 수정 기판 위에 100~350 nm 두께의 p-Si 과 150 nm 두께의 Cr 층을 차례로 적층하여 제작하였다. 크롬의 광학적 성질은 엑시머레이저 빔을 강하게 흡수하는 반면 온도의 영향을 거의 받지 않으므로 온도 계측을 위해 굴절율의 온도계수가 큰 p-Si 을 삽입하였다. Ellipsometer 를 이용하여 자체 측정된 결과에 따르면 수정 기판과 p-Si 박막의 굴절율 변화는 다음과 같다 ( $\lambda=623.8 \text{ nm}$ , unpolarized,  $T$  in  $^{\circ}\text{C}$ ).

$$n_{\text{quartz}} = 1.457 + 9.59 \times 10^{-6} (T - T_0) + 7.60 \times 10^{-9} (T - T_0)^2 \quad (8)$$

$$n_{\text{p-Si}} = 4.12 + 4.45 \times 10^{-4} (T - T_0) \quad (9)$$

$$k_{\text{p-Si}} = 0.0485 \exp \left( \frac{T}{900} \right) \quad (10)$$

반사율과 굴절신호 계측에 이용되는 탐사광으로는 연속파 HeNe 레이저 ( $\lambda=632.8 \text{ nm}$ )를 이용하였고 신호는 고속 PIN 광다이오드 (상승시간 < 1 ns)에 의해 검출되었다.

### 4. 결과 및 토의

#### 4.1 온도 계측 결과

시편의 온도 변화에 따른 반사율 변화 신호의 전형적인 예를 Fig. 3 에 실선으로 도시하였다. 반사율 신호로부터 2.1 절에 서술된 방법으로 시편의 표면 온도를 예측할 수 있으며 결과 중 하나를 Fig. 4 에 나타내었다. 또한 Fig. 5 에는 실험을 통해 측정된 표면의 최고 온도를 레이저 플루언스의 함수로 나타내었다. 처음에는 레이저 플루언스에 비례하여 온도가 증가하다가 액체의 기화가 시작되는 열역학적 임계점에 근접하면서 온도상승률이

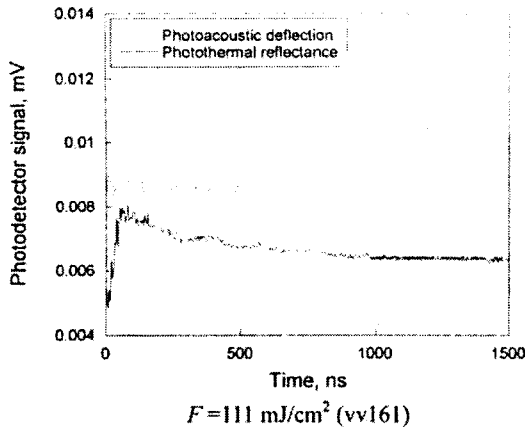


Fig. 3 Photothermal reflectance on the back surface of the sample and photoacoustic deflection signals simultaneously detected by HeNe laser probes in excimer laser induced vaporization of water ( $F = 111 \text{ mJ/cm}^2$ )

둔화되는 과정이 그림에 표시되어 있다. 온도계측과 더불어 시편의 전면에서 탐사광의 산란에 의한 반사율 변화를 측정 한 실험 결과에 따르면, 기포가 처음 생성되는 한계 레이저 플루언스는  $F = 49.8 \text{ mJ/cm}^2$  이다. 이 때 Fig. 5 에서 최고 표면 온도가 약 500 K 이고 액체의 끓는점이 373 K 이므로 액체의 과열도가 약 100 K 임을 알 수 있다. 현재의 온도 상승률이 약  $\sim 10^9 \text{ K/s}$  정도임을 감안하면  $\sim 10^{10} \text{ K/s}$  이상의 급속한 가열 시에는 열역학적 임계값 (spinodal limit)에 근접한 정도의 과열도가 얻어질 것으로 추정할 수 있다. 이러한 결과는 레이저 어블레이션 (ablation) 의 열역학적 모델링에서 액체가 상변화 없이 과열한계까지 과열된 후 폭발적으로 기화한다는 기존의 연구를 간접적으로 뒷받침 해준다.

실험결과 제안된 광학적 온도측정 기법이 대단히 좋은 재현성을 보임을 확인하였다. 하지만 Fig. 4 에 나타난 실험 결과를 살펴보면 광학적/전기적 노이즈 때문에 온도의 측정 정밀도가 상승폭의 약 20~30 %에 이르는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 온도의 정확한 정량화를 위해서는 불만족스러운 결과이지만 본 연구의 주 목적이 온도 센서의 개발이 아니라 나노초 폭발적 기화 과정의 실험적 해석과 그를 위한 비교적 단순한 광학 기법의 확립이므로 측정 오차를 더 이상 감소시키려는 시도는 하지 않았다. 그러나 HeNe 레이저 빔을

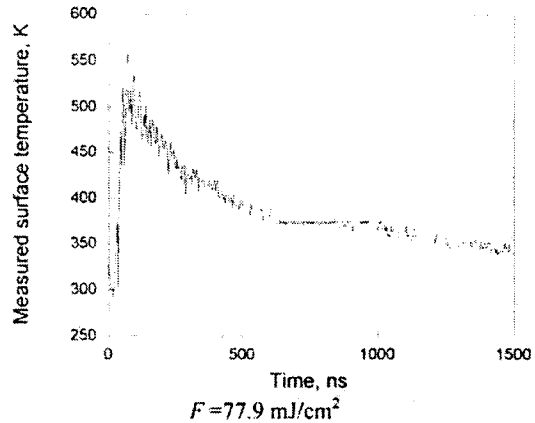


Fig. 4 Temporal variation of surface temperature ( $F = 77.9 \text{ mJ/cm}^2$ )

beamsplitter 로 분할하여 빔의 강도를 반사광의 강도로 감쇄시킨 후, 차동증폭기를 이용하여 광학적 노이즈 성분을 제거하면 향상된 정밀도를 얻을 수 있을 것이다. 상대적으로 큰 측정 오차에도 불구하고 본 연구 결과는 단순한 광반사율 측정 기법이 나노초 단위의 다양한 온도계측에 응용될 수 있음을 잘 보여준다.

#### 4.2 압력 측정 결과

압력파가 물속을 진행하면 시편 표면에 수직인 방향으로 밀도 구배가 형성되고 시편 표면에 평행하게 진행하던 탐사광의 경로가 변화하는데, 이때의 경로 변화를 knife edge 를 이용하여 측정 한 전형적인 신호가 Fig. 3 에 점선으로 나타나 있다. Fig. 6 에는 굴절신호를 굴절각으로 변화하여 압력을 계산하는 과정의 예를 표시하였다 ( $F = 46 \text{ mJ/cm}^2$ ,  $w_0 = 12.3 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $l = 7 \text{ mm}$ ). Fig. 7 에 나타난 결과에 따르면 10~100  $\text{mJ/cm}^2$  의 레이저 플루언스 범위에서 약 0.05~0.8 MPa 의 진폭과 50~100 ns 의 반치전 폭을 가진 압력파가 발생함을 알 수 있다. Fig. 7 에는 압전 압력센서를 이용한 압력 측정 결과 또한 표시하였다. 그 결과에서 압력파의 크기가 약 50% 정도의 오차범위 내에서 서로 일치하고 압력파의 형상이 매우 유사함을 알 수 있다. 실험에 이용된 압력센서는 압전계수 보정 오차가 상당히 크고, 압력센서의 지지 방법에 따라 출력전압이 수십 % 정도 변화하기 때문에 절대값의 직접 비교가 큰 의미는 없으나, 이러한 실험 결과는 광음굴절법이 나노초 폭발적 기화 과정의 분석에 정량

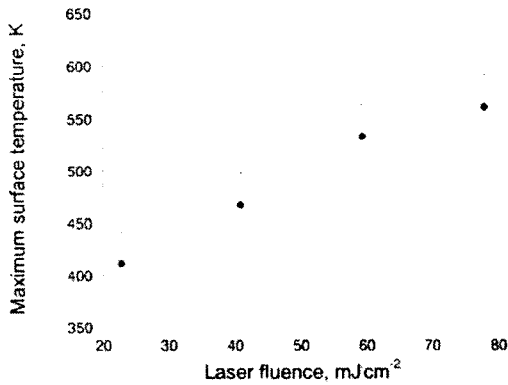


Fig. 5 Maximum surface temperature measured by the photothermal reflectance method for several laser fluences

적으로 이용될 수 있음을 시사해 준다. 실험에서 광학적으로 측정된 압력파의 반치전폭이 상대적으로 큰 것은 레이저 빔의 집속이 완벽하지 않고 유한한 직경을 갖기 때문이다. 측정된 빔의 최소 반지름이 12.3 μm 이므로 시간 정밀도는 17 ns 보다 커지게 된다. 따라서 빔의 지름을 줄이고 초점깊이 (depth of focus)를 증가시킬 수 있는 광학계를 구성하면 측정 정밀도를 한층 증가시킬 수 있을 것으로 예상된다.

낮은 레이저 플루언스에서 압력파는 시편의 열탄성 팽창에 의해 생성된다. 하지만 레이저 플루언스가 기포 핵생성에 필요한 한계값을 넘으면 기포의 급속한 팽창에 의하여 압력파의 크기가 급격히 증가하고 파폭의 길이가 길어지게 된다. Fig. 7에서 보면 레이저 플루언스가 증가하면서 파폭이 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 이는 열탄성 현상의 시간 스케일이 레이저 펄스 폭과 유사한 크기를 갖는 반면 기포가 성장하는 특성시간은 그보다 훨씬 길기 때문이다. 광간섭법을 이용하여 기포의 거동을 측정한 연구 결과에 따르면 기포는 300~500 ns 동안 성장한 뒤 소멸하게 된다.<sup>(7,8)</sup> 또한 Fig. 7을 살펴보면 각 압력파가 약한 팽창파를 수반하는 것을 볼 수 있는데 이는 압력파 말미에 온도 감소의 영향과 압력파의 회절 현상 때문에 나타난다.<sup>(27)</sup>

1 차원 음파의 단위 면적당 에너지는 아래의 식에 의해 계산된다.<sup>(28)</sup>

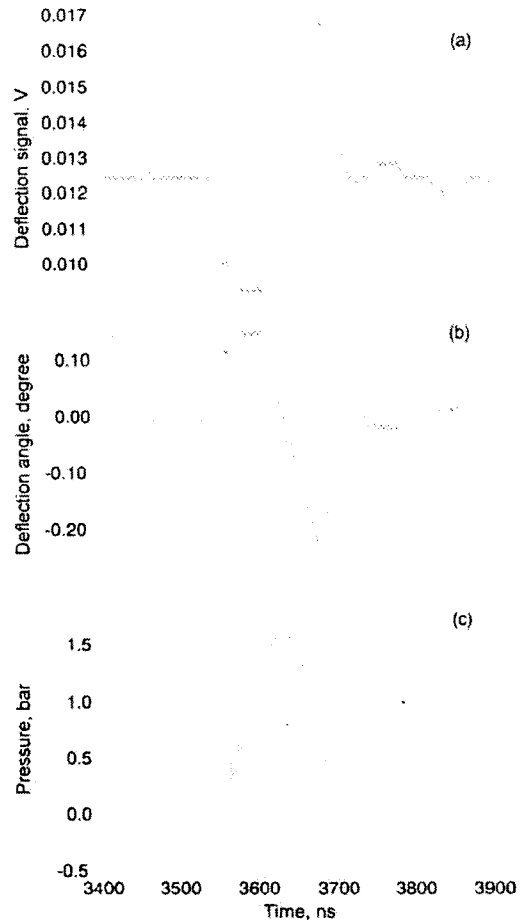


Fig. 6 The deflection signal received by the photodetector (a) for water irradiated with the excimer laser fluence of 46.1 mJ/cm². Also shown are (b) the converted deflection angle, and (c) the pressure rise

$$E_u = \frac{1}{2\rho c} \int P^2 dt \quad (11)$$

본 실험에서 측정된 압력을 이용하여 레이저 플루언스  $F = 58.1 \text{ mJ/cm}^2$ 에서 위의 에너지를 계산하면  $8.7 \times 10^{-4} \text{ mJ/cm}^2$  이고 그에 상응하는 전자기음향 에너지 변환효율은 0.0015 %이다. 반면 33.5 mJ/cm²에서 액체의 기화가 일어나지 않고 단지 열탄성파만 생성되는 경우, 음향에너지와 변환효율은 각각  $1.20 \times 10^{-4} \text{ mJ/cm}^2$ 와 0.00036 %이다. 따라서 습식 레이저세척 공정에서와 같이 레이저 가공 공정과 기액상변화 현상을 결합하면 압력파 생성에 따른 기계적 효과를 매우 크게 증진시킬 수 있

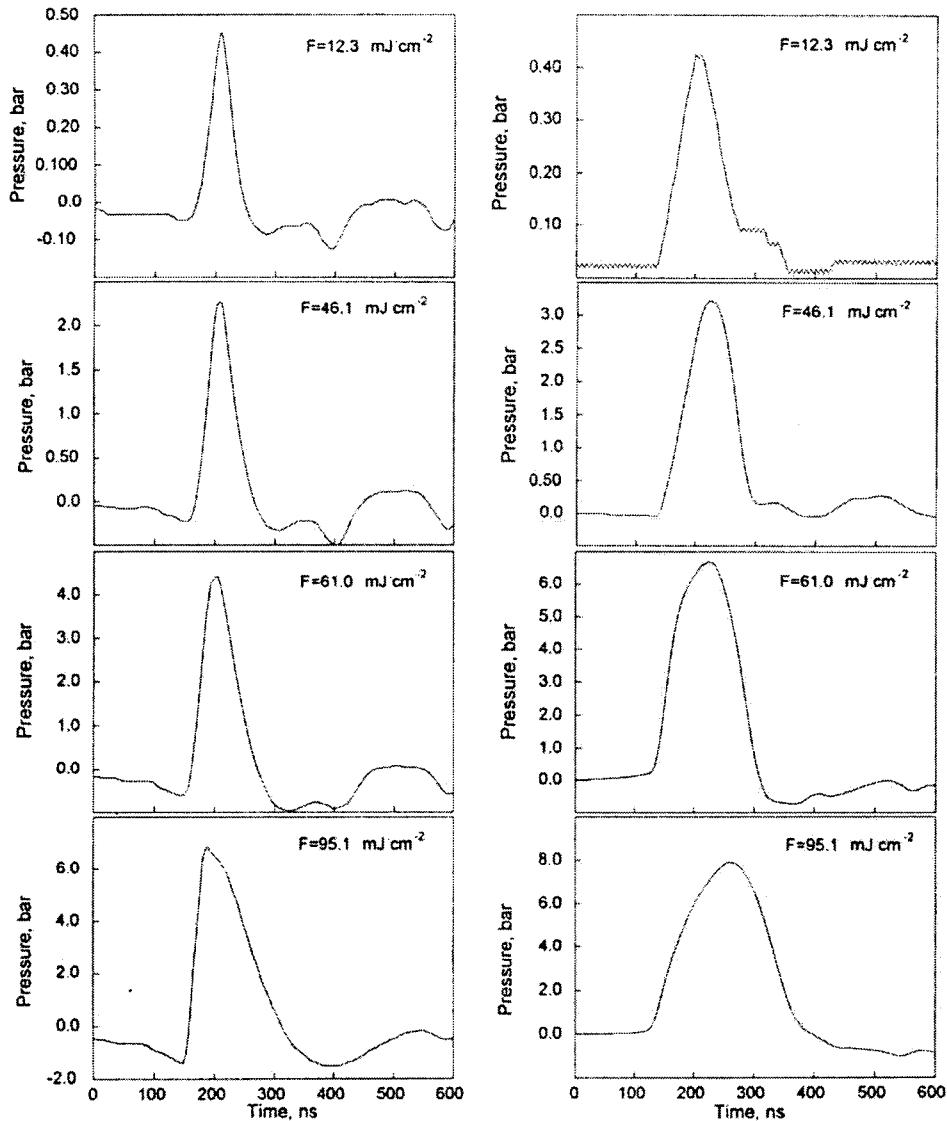
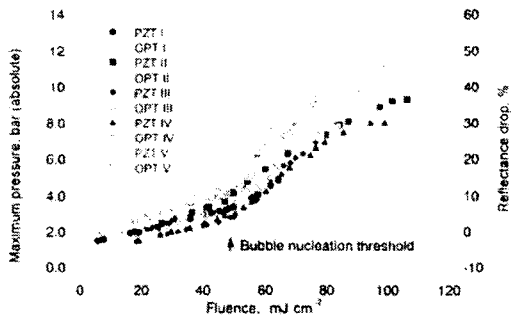


Fig. 7 Transient pressure detected by the piezoelectric transducer (left column) and photoacoustic probe beam deflection technique (right column) for water at various excimer laser fluences

음을 알 수 있다. 이러한 결과는 금속의 표면에 액막이 존재하면 레이저 조사에 의해 발생하는 음파의 크기가 크게 증가한다는 과거 연구 결과에 잘 부합된다.<sup>(29,30)</sup>

레이저 플루언스에 따른 압력파 진폭의 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 그림에는 기화가 시작되면서 압력파가 증가하는 현상이 잘 나타나있다. 하지만 레이저 플루언스가 약 100 mJ/cm<sup>2</sup>를 넘어서면 압력파의 크기가 더이상 증가하지 않고 포화되는 현

상이 관측되어진다. 이는 크롬-물 계면에서 수직 음향 반사율이 0.88인 반면 수증기-크롬의 계면에서의 반사율은 0.9999에 이르므로 기포의 양이 많아 지면서 압력파의 회절 및 감쇄가 커지고, 압력파가 생성되는 시편 표면으로부터 주위 액체로의 음향 투과율이 급격히 떨어지기 때문일 것으로 추정된다. 같은 이유로 열탄성 기구에 의해 고액 계면에서 생성된 압력파의 투과율 또한 기포생성과 더불어 급격히 감소할 것이다.



**Fig. 8** The pressure pulse amplitudes are plotted as a function of excimer laser fluence (PZT: data by pressure transducer, OPT by the deflection probe). The amplitude of the optical specular reflectance drop is also plotted with the dashed line

액체의 기화가 시작되는 레이저 플루언스 ( $F=49.8 \text{ mJ/cm}^2$ )에서 광음굴절법에 의해 측정된 압력파의 크기의 평균값은 3.8 bar 이고 광학 시스템 정렬 (alignment)을 다시 하여 독립적으로 수행한 5 회 측정값의 표준편차는 0.4 bar 이다. 반면, 압전 소자를 이용한 측정에서는 압력 평균값이 3.5 bar 이고 표준편차가 0.6 bar 로 나타났다. 이러한 결과는 광학적 압력 측정기법이 약 10% 이내의 재현성을 지니고 있으며 일반적인 압전소자를 이용한 방법보다 효과적임을 나타낸다. 압전센서를 이용한 측정에서 센서를 동일한 조건으로 가능한 한 단단히 고정시켰으나 센서의 미세한 방향 변화가 측정값에 미치는 영향이 상대적으로 컸다. 광학적 기법에서 오차의 가장 큰 원인 역시 레이저 빔의 정렬로 추정된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 펄스레이저에 의해 유기된 나노초 폭발적 기화 과정을 해석하기 위해 온도, 압력 측정 장치를 구성하고 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험적인 박막의 반사율 변화와 수치 계산 결과를 이용하여 고액 표면의 온도를 나노초 시간 정밀도로 예측할 수 있음을 보였다.
- (2) 나노초 펄스레이저에 의해 발생하는 압력파를 측정하기 위해 광음굴절기법을 적용하여, 약 10 MHz 이상의 시간 정밀도를 가지고 압력파의 크기를 정량화 할 수 있음을 보였다. 또한 실험을

통해 측정 정밀도가 통상적인 압전소자를 이용한 측정과 유사함을 보였다.

(3)  $10^9 \text{ K/s}$  정도의 온도 증가율을 갖는 나노초 폭발적 기화 과정에서 액체의 과열도가 약 100 K 에 이를 수 있음을 실험적으로 입증하였다.

(4) 펄스레이저에 의한 압력파 발생 시, 낮은 플루언스에서는 열탄성파가 생성되며 전자기-음향에너지 변환효율은  $O(\sim 10^{-4} \%)$ 이고, 레이저 플루언스가 기포핵생성에 필요한 한계값을 넘으면 액체의 폭발적 기화에 의해 압력파의 크기가 급격히 커지고 에너지 변환효율 또한 증가한다.

### 후 기

이 논문은 마이크로 열시스템 ERC 의 지원으로 연구되었음.

### 참고문헌

- (1) Tam, A. C., Leung, W. P., Zapka, W., and Ziemlich, W., 1992, "Laser-Cleaning Techniques for Removal of Surface Particulates," *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, pp. 3515~3523.
- (2) Park, H. K., Grigoropoulos, C. P., Leung, W. P., and Tam, A. C., 1994, "A Practical Excimer Laser-Based Cleaning Tool for Removal of Surface Contaminants," *IEEE Transactions of Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part A*, Vol. 17, pp. 631~643.
- (3) She, M., Kim, D., and Grigoropoulos, C. P., 1999, "Liquid-Assisted Pulsed Laser Cleaning Using Near-Infrared and Ultraviolet Radiation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, No. 11, pp. 6519~6524.
- (4) Kim, D. and Lee, J. 2002, "On the Physical Mechanisms of Liquid-Assisted Laser Cleaning," to appear in *Journal of Applied Physics*.
- (5) Vogel, A., Schweiger, P., Frieser, A., Asiyu, M. N., and Birngber, R., 1990, "Intraocular Nd:YAG Laser Surgery: Light-Tissue Interaction, Damage Range, and Reduction of Collateral Effects," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 26, pp. 2240~2260.
- (6) Teng, P., Nishioka, N. S., Anderson, R. R., and Deutsch, T. F., 1987, "Optical Studies of Pulsed-Laser Fragmentation of Biliary Calculi," *Applied Physics B*, Vol. 42, pp. 73~78.
- (7) Kim, D., Park, H. K., and Grigoropoulos, 2001, C. P., "Interferometric Probing of Rapid Vaporization at a Solid-Liquid Interface Induced by Pulsed Laser Irradiation," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, No. 20, pp. 3843~3853.
- (8) Kim Dongsik, Park Hee K. and Grigoropoulos, C. P.,



- 2001, "Probing of Microscale Phase-Change Phenomena Based on Michelson Interferometry." *Trans. of the KSME*, B, Vol. 25, No. 8, pp. 1140~1147.
- (9) Park, H. K., Zhang, X., Grigoropoulos, C. P., Poon, C. C., and Tam A. C., 1995, "Transient Temperature development During the Vaporization of Liquids on a Pulsed-Laser Heated Solid Surface," *ASME Transactions of Journal of Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 702~708.
- (10) Dyer, P. E. and Sidhu, J., 1985, "Excimer Laser Ablation and Thermal Coupling Efficiency to Polymer Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 57, pp. 1420~1422.
- (11) Gorodestsky, G., Kazyaka, T. G., Melcher, R. L., and Srinivasan, R., 1986, *Applied Physics Letters*, Vol. 46, pp. 828~830.
- (12) Brunco, D. P., Thompson, M. O., Otis, C. E., and Goodwin, P. M., 1992, "Temperature Measurement of Polyimide during KrF Excimer Laser Ablation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 72, pp. 4344~4350.
- (13) Jellison, G. E., Jr., Lowndes, D. H., Mashburn, D. N., and Wood, R. F., 1986, "Time-Resolved Reflectivity Measurements of Silicon and Germanium Using a Pulsed Excimer KrF Laser Heating Beam," *Physical Review B*, Vol. 34, No. 4, pp. 2407~2415.
- (14) Jellison, G. E., Jr., and Burke, H. H., 1986, "The Temperature Dependence of the Refractive Index of Silicon at Elevated Temperatures at Several Laser Wavelengths," *Journal of Applied Physics*, Vol. 60, No. 2, pp. 841~843.
- (15) Schoeffmann, H., Schmidt-Kloiber, H., and Reichel, E., 1987, "Time-Resolved Investigations of Laser-Induced Shock Waves in Water by Use of Polyvinylidene fluoride Hydrophones," *Journal of Applied Physics*, Vol. 63, pp. 46~51.
- (16) Leung, W. P. and Tam, A. C., 1992, "Noncontact Monitoring of Laser Ablation Using a Miniature Piezoelectric Probe to Detect Photoacoustic Pulses in Air," *Applied Physics Letters*, Vol. 60, pp. 23~25.
- (17) Vogel, A., Lauterborn, W., and Timm, R., 1989, "Optical and Acoustic Investigations of the Dynamics of Laser-Produced Cavitation Bubbles Near a Solid Boundary," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 206, pp. 299~338.
- (18) Ward, B., and Emmony, D. C., 1991 b, "Interferometric Studies of the Pressures Developed in a Liquid During Infrared-Induced Cavitation-Bubble Oscillation," *Infrared Physics*, Vol. 32, pp. 489~515.
- (19) Harith, M. A., Palleschi, V., Salvetti, A., Singh, D. P., Vaselli, M., Dreiden, G. V., Ostrovsky, Y. I., and Semenova, I. V., 1989, "Dynamics of Laser-Driven Shock Waves in Water," *Journal of Applied Physics*, Vol. 66, pp. 5194~5197.
- (20) Doukas, A. G., Zweig, A. D., Frisoli, J. K., Birngruber, R., and Deutsch, T. F., 1991, "Non-Invasive Determination of Shock Wave Pressure Generated by Optical Breakdown," *Applied Physics B*, Vol. 53, pp. 237~245.
- (21) Do, N., Klees, L., Tam, A. C., Leung, P. T., and Leung, W. P., 1993, "Photodeflection Probing of the Explosion of a Liquid Film in Contact with a Solid Heated by Pulsed Excimer Laser Irradiation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, 1534~1538.
- (22) Born, M., and Wolf, E., 1980, "Principles of Optics," Pergamon Press, Oxford.
- (23) Jacobsson, R., 1965, "Light Reflection from Films of Continuously Varying Refractive Index," in *Progress in Optics*, Vol. 5, E. Wolf, Ed., North-Holland, Amsterdam, pp. 247~286.
- (24) Sigrist, M. W., 1986, "Laser Generation of Acoustic Waves in Liquids and Gases," *Journal of Applied Physics*, Vol. 60, pp. R83~R121.
- (25) Tam, A. C., 1986, "Applications of Photoacoustic Sensing Techniques," *Review of Modern Physics*, Vol. 58, pp. 381~431.
- (26) Schiebener, P., Straub, J., Levelt Sengers, J. M. H., and Gallagher, J. S., 1990, "Refractive Index of Water and Steam as Function of Wavelength, Temperature, and Density," *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 19, pp. 677~717.
- (27) Terzic, M., and Sigrist, M. W., 1984, "Diffraction Characteristics of Laser-Induced Acoustic Waves in Liquids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 56, pp. 93~95.
- (28) Edmonds, P. D., and Dunn, F., 1981, *Methods of Experimental Physics - Ultrasonics*, edited by P. D. Edmonds, Academic Press, New York, Vol. 19, p. 7.
- (29) Hutchins, D. A., Dewhurst, R. J., and Palmer, S. B., 1981, "Laser Generated Ultrasound at Modified Metal Surfaces," *Ultrasonics*, Vol. 19, pp. 103~108.
- (30) Kim Dongsik and Lee Ho, 2001, "Enhancement of Pulsed-Laser Ablation by Phase Explosion of Liquid," *Trans. Of the KSME B*, Vol. 25, No. 11, pp. 1483~1491.