

< 논문 >

흡광 액체의 펄스 레이저 가열에 의해 생성된 기포 거동의 실험적 해석

장덕석* · 홍종간* · 김동식† · 좌성훈**

(2005년 8월 12일 접수, 2006년 3월 27일 심사완료)

Experimental Analysis of Bubble Dynamics Induced by Pulsed-Laser Heating of Absorbing Liquid

Deoksuk Jang, Jonggan Hong, Dongsik Kim and Sung-Hoon Choa

Key Words : Bubble Dynamics(기포 거동), Ink-jet Printer(잉크젯 프린터), Print Head(프린트 헤드), Pulsed-Laser Heating(레이저 가열), Laser-Flash Photography(레이저 섬광 사진법)

Abstract

The bubble dynamics induced by direct laser heating is experimentally analyzed as a first step to assess the technical feasibility of laser-based ink-jet technology. To understand the interaction between laser light and ink, the absorption spectrum is measured for various ink colors and concentrations. The hydrodynamics of laser-generated bubbles is examined by the laser-flash photography. When an Ar ion laser pulse (wavelength 488 nm) with an output power up to 600 mW is incident on the ink solution through a transparent window, a hemispherical bubble with a diameter up to ~100 μm can be formed with a lifetime in a few tens of microsecond depending on the laser power and the focal-spot size. Parametric study has been performed to reveal the effect of laser pulse width, output power, ink concentration, and color on the bubble dynamics. The results show that the bubble generated by a laser pulse is largely similar to that produced by a thin-film heater. Consequently, the present work demonstrates the feasibility of developing a laser-actuated droplet generation mechanism for applications in ink-jet print heads. Furthermore, the results of this work indicate that the droplet generation frequency is likely to be further increased by optimizing the process parameters.

기호설명

l_0 : 레이저 빔에 의한 열 침투 깊이(m)
 l_t : 저항 히터에 의한 열 침투 깊이(m)
 p_{amb} : 대기압(N/m²)
 p_{sat} : 포화 수증기압(N/m²)
 r : 기포의 반지름(m)
 R_{max} : 기포의 최대 크기(m)
 t : 시간(s)
 t_0 : 가열 시간(s)
 t_{col} : 기포의 소멸 시간(s)

T_{amb} : 상온(K)
 α : 유체의 열확산도(m²/s)
 κ : 빛의 흡광 계수(m⁻¹)
 ρ_l : 액체의 밀도(Kg/m³)
 τ : 기포 생성의 최소 요구 시간(s)

1. 서론

마이크로 저항 히터를 이용하여 잉크에 급속히 열을 공급하여 기포를 생성하고, 이때 생성된 기포를 이용하여 피코리터 수준의 액적을 토출하는 기법이 최근까지 주류를 이루고 있는 잉크젯 프린터의 액적 생성 기법이다. 그러나 저항 발열체를 이용한 이 방식은 히터를 통해 잉크 가열 시에 헤드 주변부의 온도가 같이 증가하게 되므로 냉각에

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : dskim87@postech.ac.kr

TEL : (054)279-2179 FAX : (054)279-3199

** 회원, 삼성 MEMS lab.

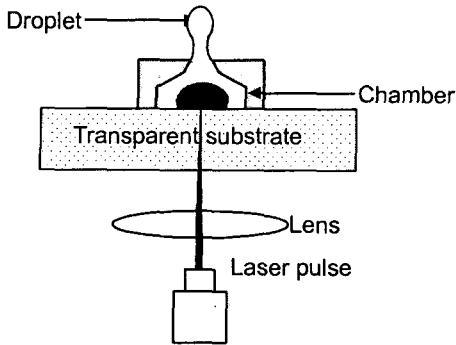


Fig. 1 Concept of droplet ejection by direct laser heating of absorbing liquid in a chamber

소요되는 시간이 길어 액적의 토출 주기가 수십 kHz 정도로 제한된다. 최근 프린팅 속도를 높이기 위하여, 저항체 발열방식을 대체하여 레이저 빔을 이용하는 방법, 연속적인 잉크 액적 생성 후 액적의 경로를 조절하는 기법, 잉크 액막을 전송하는 기법 등의 새로운 잉크젯 프린팅 기법들이 연구되고 있다. 이러한 다양한 방법 중, 레이저를 이용한 잉크의 직접 가열 방법에서는 잉크가 레이저 에너지를 직접 흡수하여 기포가 생성된다. 따라서 헤드 부분의 온도 상승이 기존의 저항 발열체 방식에 비해 적어 잉크의 가열 및 냉각 시간에 있어 높은 효율을 낼 수 있고 이러한 기본 개념을 바탕으로 한 특허들이 몇몇 출원되어 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 그러나 이러한 특허들은 모두 단순한 아이디어에 기반한 것으로서 잉크에 레이저 빔이 조사될 때 나타나는 현상이 아직 명확히 규명되지 못한 실정이다.

본 연구에서는 잉크에 레이저 빔이 조사되었을 시에 발생하는 기포 생성 현상을 레이저 섬광사진법(laser-flash photography)을 이용하여 가시화하고, 기포의 거동을 실험적으로 규명하였다. 저항 히터를 이용한 기포 생성시의 현상들은 이론 및 실험을 통하여 많이 연구되어 진 반면,⁽⁸⁻¹⁰⁾ 레이저를 이용한 기포생성 현상은 그 연구가 매우 미흡한 실정이다. 특히 고 에너지 펄스 레이저 빔을 액체에 조사할 때 발생하는 기포의 거동은 상대적으로 많이 연구 되어졌지만,⁽¹¹⁻¹⁷⁾ 잉크젯 프린팅에 이용 가능한 조사도($10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$)를 가지는 레이저 플루언스 영역에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구는 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 의 조사도를 가지는 레이저 빔을 흡광 액체에 조사하였을 때 나타나는 기포의 거동을 규명하는데 그 목적을 두고 있다.

2. 레이저를 이용한 기포생성의 개념

흡광 액체에 레이저 빔을 조사하면 여러 가지

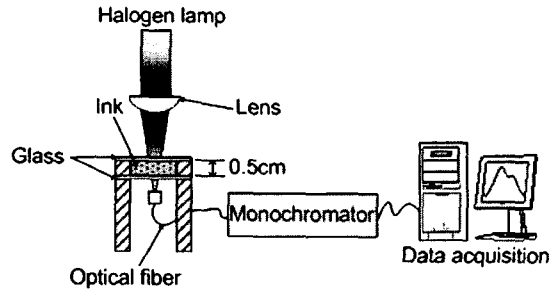


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for absorption-spectrum measurement

기작을 통하여 액적을 생성할 수 있다. 높은 에너지 밀도를 가지는 레이저 빔을 액체의 자유 표면에 조사할 때 발생하는 급격한 증발 현상을 이용하여 어블레이션 플룸(ablation plume)으로부터 일정량의 액적을 만들어 낼 수 있으며, 열적 팽창을 유도하여 액적을 토출해 낼 수도 있다. 또한, 현재 상업적으로 사용되고 있는 열 저항체를 이용한 액적의 토출하는 방식에서 열 저항체를 레이저로 대체할 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 기법들 중 레이저로 직접 기포를 생성하는 방법에 대한 기초 연구를 수행하였다. Fig. 1 은 저항체를 레이저로 대체한 레이저 직접 구동 프린팅의 기본개념을 나타낸 개략도이다.

3. 잉크의 흡광 특성

잉크의 흡광 특성을 조사하기 위하여 우선 빛의 파장에 따른 흡수 정도를 실험하였다. 붉은색, 푸른색, 노란색, 검은색의 잉크젯 프린터용 상용 잉크(JETRON KOREA LTD.)를 이용하여 흡광 실험을 수행하였다. Fig. 2 와 같은 흡광 실험 장치를 이용하여 빛이 잉크를 투과한 후의 강도 감소 정도를 측정하여 파장에 따른 흡수 정도를 알아보았다.

5 mm의 두께를 가지는 유리 큐벳(cuvette)에 잉크를 담고 할로겐 램프를 이용하여 빛을 조사한 후, 통과한 램프의 빛을 분광기를 이용하여 400 nm에서 850 nm까지 파장에 따른 강도를 측정하였다. 실험에서는 잉크 대신 물을 투과한 원래의 빛의 강도를 측정하고 잉크를 통과한 이후의 빛의 흡수 정도를 비교하여 상대적인 빛의 흡광 정도를 측정하였다. 잉크의 색, 농도 및 파장에 따른 흡수 스펙트럼이 Fig. 3에 나타나 있다.

검은색 잉크의 경우 농도에 무관하게 가시광선 영역에서 근적외선 영역까지 흡수 정도가 매우 높은 반면, 노란색 잉크의 경우 400 nm에서 500 nm

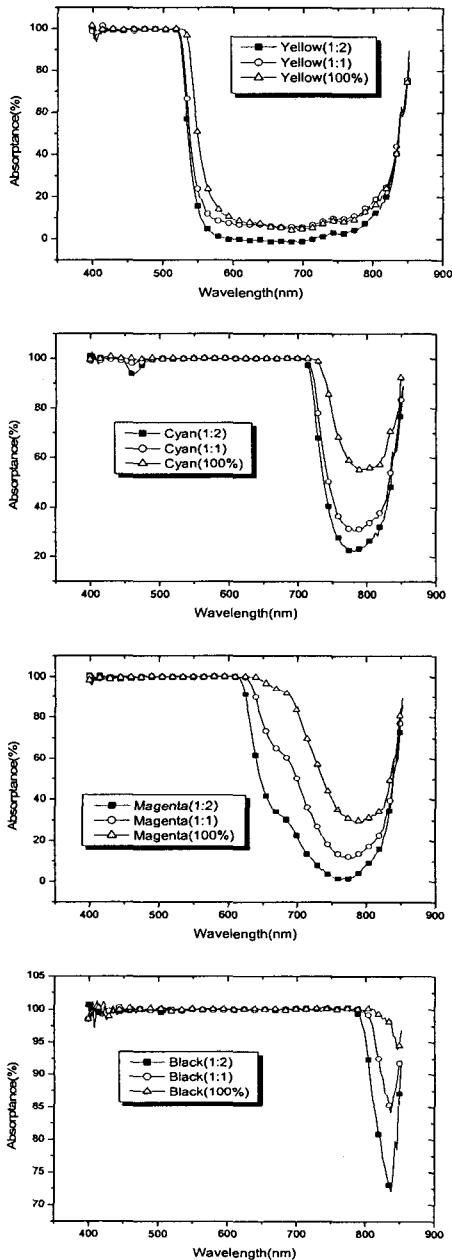


Fig. 3 Transmission spectrum for various ink colors and concentrations

의 파장 영역에 대해서만 높은 흡수를 보임을 알 수 있다. 4 가지 색의 잉크에 대해서 400 nm 에서 500 nm 의 영역에 대해서는 모두 높은 흡수 특성을 보임을 알 수 있다. 본 연구에서 잉크를 가열하는데 사용한 레이저는 488 nm 의 파장을 가지는 Ar 이온 레이저로 모든 색깔의 잉크의 대해서 높은 흡수 정도를 가지고 있음을 알 수 있다. 흡광

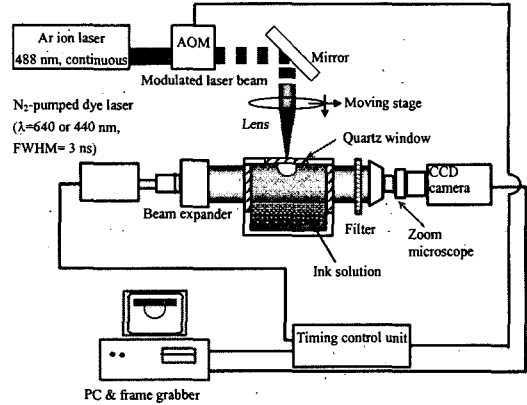


Fig. 4 Experimental setup for fast photography

실험에 사용한 유리 큐벳은 5 mm 의 두께를 가지고 있으므로 빛의 침투 깊이에 비해서 상대적으로 매우 두껍다. 따라서 정확한 잉크의 흡수도를 알기 위해서는 잉크의 굴절률을 알 필요가 있다. 이를 위해서 150 μm 의 두께를 가지는 잉크 막을 만들어 488 nm 에 대해서 흡수 실험을 수행하였다. 본 기포생성 실험에서 주로 사용되는 붉은색 잉크의 경우, 25 %와 33 %의 볼륨 농도를 가지는 혼합 액체에 대한 흡광 계수 κ 는 1.04×10^4 과 $1.10 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 으로 나타났다.

4. 기포 생성 및 가시화 실험

기포 거동을 관찰하기 위해서 Fig. 4 와 같은 레이저 선험 실험 장치를 이용하여 기포의 생성 및 거동을 관찰하였다. 연속파 Ar 이온 레이저(파장: 488 nm)를 AOM (acousto-optic modulator)을 이용하여 일정 펄스 폭을 가지는 펄스 레이저 빔으로 변조하여 증류수와 잉크의 혼합 액체에 조사한다. 레이저 조사 후 일정 시간이 흐른 뒤 N₂-여기 색소 레이저(파장: 640 nm 또는 440 nm, 펄스 폭: 3 ns)를 이용하여 Ar 레이저의 집광 부위를 통과하도록 조사한 후 CCD 에 영상을(shadow-graph) 담게 된다. 색소 레이저와 Ar 이온 레이저의 간격을 변화시키면서 반복 실험을 수행하게 되면 수 ns 의 시간 간격을 가지는 영상을 얻을 수 있게 된다. Ar 이온 레이저는 50 mm 의 초점 거리를 가지는 렌즈를 이용하여 집광하였으며 이때 이론적인 초점면에서의 빔의 지름은 26 μm 이다. 가시화 실험 시 100 % 의 잉크 용액을 사용하면 색소 레이저가 잉크를 통과하지 못하여 가시화가 불가능하므로 잉크에 일정량의 증류수를 혼합하여 사용하였다.

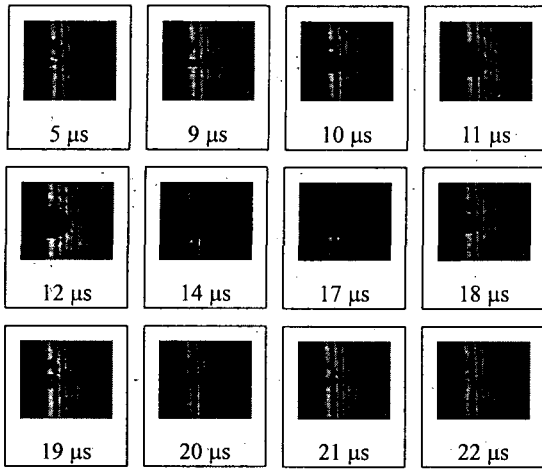


Fig. 5 Shadowgraphs of bubbles at various delay times (Ar ion laser pulse width: 9 μs, laser power: 500 mW). The image (horizontal) size is 220 μm

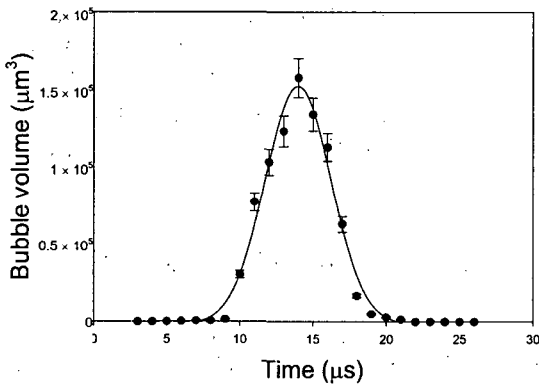


Fig. 6 Variation of bubble volume with time for a typical heating condition: laser power 500 mW, pulse width 9 μs, 33 % volume concentration (magenta)

5. 실험결과 및 고찰

5.1 레이저 빔에 의한 생성된 기포의 거동

레이저 빔을 물과 붉은색 잉크의 혼합용액에 조사하였을 때 일정시간(time for bubble incipience, τ)이 경과한 후 반 구형의 기포가 생성 및 성장하게 된다. 잉크젯 프린터에서 구동 속도는 기포의 생성과 이후 냉각 시간에 의해서 결정되게 된다. 따라서 기포의 생성이 빠른 시간 안에 가능할수록 높은 구동속도를 구현할 수 있게 된다. 33 %의 농도를 지니는 붉은색의 잉크에 레이저 빔 조사되었을 때에 생성되는 기포의 시간적인 거동이 Fig.

5에 나타나 있다.

레이저 빔의 조사 시간이 기포 생성 최소 요구 시간인 τ보다 길 때, 약 100 μm의 크기를 가지는 반구형의 기포가 생성된다. 빔의 조사 시간이 τ보다 짧을 때에는 빔의 조사 지점에 수 μm의 크기를 가지는 기포가 관찰 되지만 100 μm 수준의 기포로 성장하지 못하고 빔 조사가 끝남과 동시에 사라지게 된다. 9 μs의 펄스 폭을 가지는 레이저 빔을 33 %의 잉크 용액에 조사하였을 때 생성되는 기포의 부피가 Fig. 6에 나타나 있다. 본 결과에 나타난 기포의 부피는 가시화 실험에 의한 사진에서 도출된 것으로 환산 과정에서 ±8 %의 오차를 가진다. 그림에서 볼 수 있듯이 기포의 생성에 소요되는 시간이 약 10 μs이며, 생성 이후 소멸하는데 10 μs의 시간이 소요된다. 수십 kHz의 구동 속도를 가지는 기존의 저항체 발열 방식의 잉크젯 프린터에서 기포의 반복적인 생성 및 소멸에 소요되는 시간(약 수십 μs)과 비교하여 볼 때 레이저 발열 방식에 의한 기포 거동의 시간 특성은 유사한 내용을 가짐을 알 수 있다.

기포의 성장 특성 중, 열전달 제어 영역에서는 기포의 반지름 r과 시간 t은 r~t^{0.5}의 관계를 가지며, 관성력 제어 영역에서는 r~t의 관계를 가진다.⁽¹⁷⁾ 본 실험에서 관찰된 10 μs 이후 기포의 성장 특성은 r~t^{0.5}의 관계를 가지므로, 열전달 효과가 중요함을 알 수 있다.

구형 공동의 특성을 통해 기포의 소멸시간 t_{col}를 근사적으로 예측하기 위해 아래 관계식을 이용할 수 있다.⁽¹⁸⁾

$$t_{col} = 0.915 R_{max} \left[\frac{\rho_l}{p_{amb} - p_{sat}(T_{amb})} \right]^{1/2} \quad (1)$$

(R_{max} = 50 μm, ρ_l = 1000 kg/m³, p_{amb} = 100 kPa, T_{amb} = 300 K, p_{sat}(T_{amb}) = 3.1691 kPa)

물을 기반으로 하는 액체로부터 생성된 50 μm의 최대 반지름을 가지는 기포에 대한 식 (1)에 의한 기포 소멸시간은 약 5 μs으로 Fig. 5에서 보이는 약 100 μm의 지름을 가지는 기포의 소멸 시간 5~10 μs의 실험적인 값과 유사함을 알 수 있다.

5.2 레이저 출력에 의한 영향

기포의 생성 기간, 크기 및 부피의 변화를 액체에 공급되는 레이저의 출력에 따라 조사하였다. Fig. 7은 100 mW에서 610 mW까지의 레이저 출력을 변화시켰을 때 시간에 다른 기포의 부피 변화를 보여주고 있다.

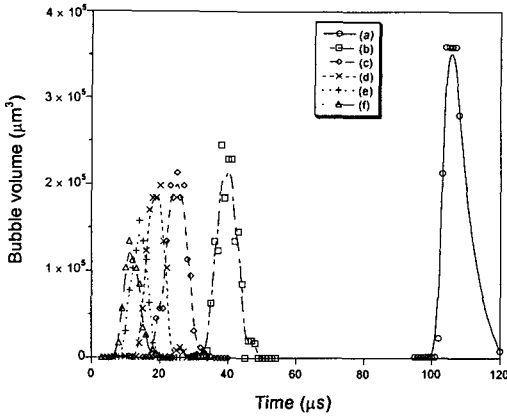


Fig. 7 Variation of bubble volume with time: (a) Ar ion laser power=100 mW, pulse width=105 μs, (b) 200mW, 35μs, (c) 300 mW, 20 μs, (d) 400 mW, 14 μs, (e) 500 mW, 9 μs, and (f) 610 mW, 7 μs. Bubbles are generated in the ink solution (33 % volume concentration)

이때 레이저 조사시간은 τ 로 한정하였다. 즉 기포가 성장하기 시작하면 레이저 빔을 차단하여 흡광 액체에 공급되는 에너지를 최소화하였다.

그림에서 볼 수 있듯이 τ 와 최대 부피는 레이저 파워가 증가함에 따라서 감소한다. 이러한 기포의 거동(시간에 따른 기포의 부피 변화)은 일반적인 열저항 히터를 사용하였을 때 나타나는 기포와 매우 유사하였다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 한 예로, 열저항 히터를 사용하여 메탄올 액체에 기포를 생성하는 실험에서는 기포의 생성 시간이 약 5 μs 이고 생성 후 소멸까지 걸리는 시간이 10 μs 이었다.⁽⁹⁾ 이때 공급된 총 에너지는 3 μJ 이었으며, 기포의 최대 반지름은 70 μm, 열유속은 $5.1 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$ 였다.

기포 생성에 들어가는 최소 에너지와 레이저 파워에 대한 관계가 Fig. 8 에 나타나 있다. 이때 액체에 공급된 에너지는 안정적인 기포 생성을 위하여 약간 초과되어 공급 되었으며, 약 ±5%의 오차를 지닌다. Fig. 8 에는 공급된 에너지와 더불어 기포의 최대 부피도 함께 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 레이저 출력이 증가함에 따라서 기포 생성에 요구되는 최소 에너지는 감소하게 된다. 이와 더불어 기포의 최대 부피는 액체에 공급되는 에너지와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있고, 공급되는 총 레이저 에너지가 감소함에 따라서 기포의 최대 크기 또한 함께 감소하게 된다.

열유속과 τ 의 상관 관계가 Fig. 9 에 나타나 있다. 이때 열유속은 공급되는 레이저 빔의 에너지 분포가 가우시안 형태를 지녔다고 가정하고, 빔의

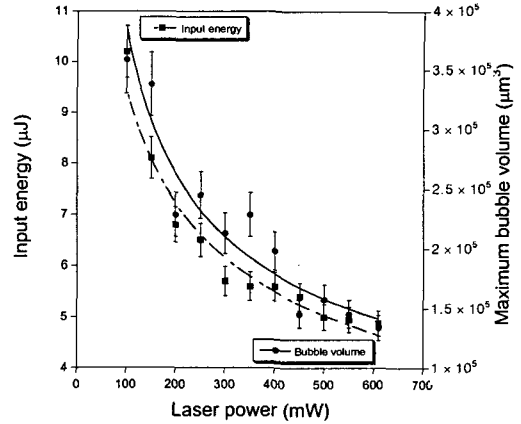


Fig. 8 Minimum energy for bubble inception and the maximum bubble volume for various laser powers

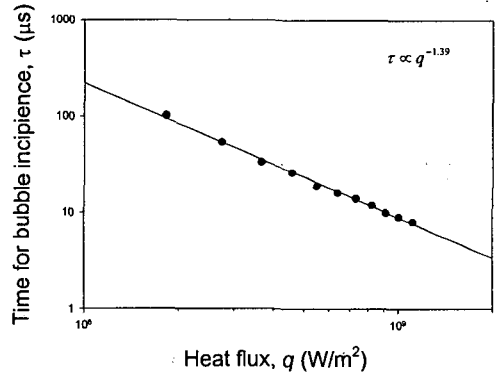


Fig. 9 Effect of heat flux on bubble inception time

지름은 이론적인 최소값 26 μm 를 사용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 열유속과 기포의 최소 생성 시간은 $\tau \propto q^{-1.39}$ 의 관계를 가진다. 이러한 상관 관계는 레이저의 파워를 증가시키거나 초점면에서의 면적을 좁혀 열유속을 증가시킬 때 기포의 생성 시간을 줄일 수 있으며, 잉크젯 프린터에 적용할 때 높은 구동속도를 구현할 수 있음을 알려준다. 레이저와 열유속의 상관 관계에서 나타나는 -1.39 의 지수는 일반적인 열저항 히터에서 나타나는 관계 $\tau \propto q^{-1.99}$ 보다 낮은 값이다.⁽¹⁰⁾ 열저항 히터의 경우 액체에 열이 침투되는 열전달 깊이 l_t 는

$$l_t \sim \sqrt{\alpha t_0} = 0.9 \mu\text{m} \quad (2)$$

인 반면, 33%의 농도를 가지는 붉은색 잉크의 경우 488 nm 의 Ar 이온 레이저에 의해서 열이 침투되는 깊이 l_0 는

$$l_0 \sim \frac{1}{\kappa} = 91 \mu\text{m} \quad (3)$$

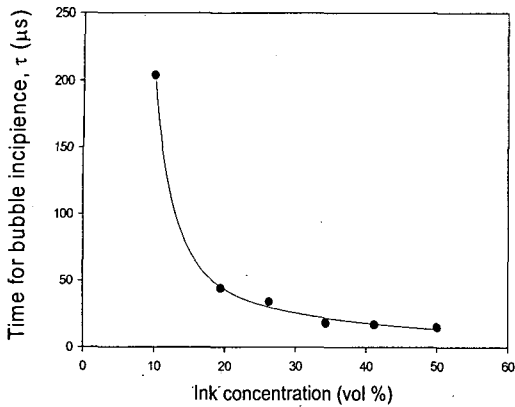


Fig. 10 Bubble incipience time for various ink concentrations for magenta ink (laser power: 270mW)

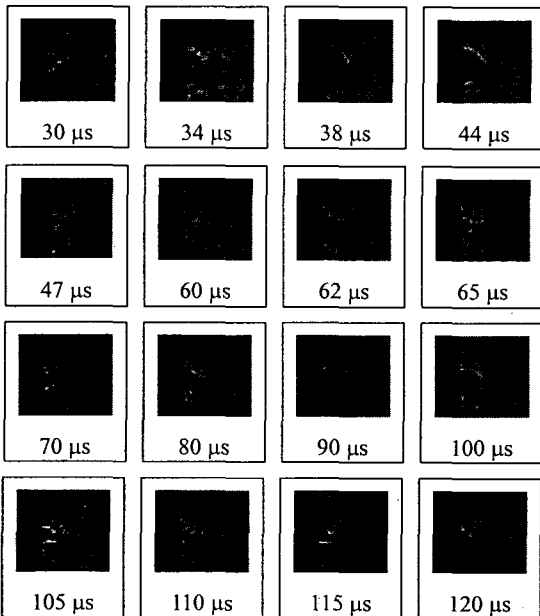


Fig. 11 Shadowgraphs of bubbles at various delay times (Ar ion laser pulse width: 100 μs , laser power: 605 mW). The image (horizontal) size is 220 μm

로 I_1 에 비해서 크기 때문이다. 따라서 레이저에 의해서 가열하는 액체의 부피가 열저항 히터에 비해서 상대적으로 크게 되고, 열유속 증가에 따른 기포 생성 시간의 감소 정도가 열저항 히터에 비해서 낮은 효율을 가지게 된다. 앞에서 말했듯이 이 실험에 사용된 흡광 액체의 경우 가시화를 위해, 잉크에 물을 첨가한 혼합 용액으로 빛의 흡수 정도가 순수한 잉크에 비해서 매우 낮으므로, 이와 같은 결과가 나타났으며, 잉크의 농도가 높아질 경우에는 변화하게 된다.

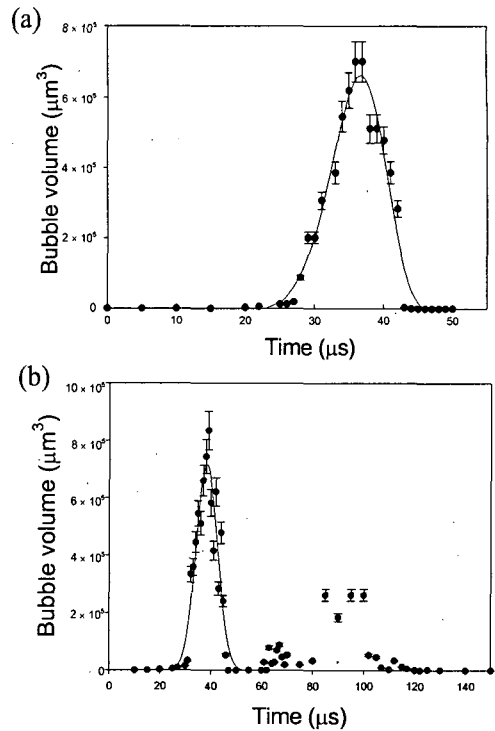


Fig. 12 Variation of bubble volume with time for a typical heating condition: laser power 605 mW, pulse width (a) 27 μs and (b) 100 μs , 50 % volume concentration (magenta)

5.3 잉크 농도에 의한 영향

잉크가 레이저 에너지를 흡수하는 정도는 Fig. 3 에도 나타나 있듯이 잉크의 농도에 따라 크게 다르다. 따라서 잉크 농도와 기포 생성 특성의 관계를 규명하는 것이 중요하다. 붉은색 잉크의 농도 변화에 따른 τ 의 변화 정도가 Fig. 10 에 나타나 있다. 잉크의 농도가 증가할수록 기포가 생성되는데 걸리는 시간이 감소함을 볼 수 있다. 잉크의 농도가 증가할 때 잉크의 빛의 흡수 정도가 증가하게 되므로 기포의 생성 시간이 감소하게 된다. 잉크의 농도가 50 % 를 넘어갈 때 가시화가 불가능하여 이 농도까지 실험을 수행하였다. 노란색 잉크를 이용하여 이와 같은 실험을 한 결과, τ 의 절대적인 값은 변화하였지만 농도와 시간과의 상관 관계는 매우 유사하였다. 270 mW 의 동일한 레이저 파워에 대해 41 % 와 100 % 의 노란색 잉크에 기포를 생성할 때 τ 는 각각, 90 μs 과 20 μs 으로 농도가 증가함에 따라서 감소하였다. 검은색과 푸른색 잉크에 대한 실험 시에 측면에 조사되는 색소 레이저 빔의 투과가 현저히 감소하여 그 결

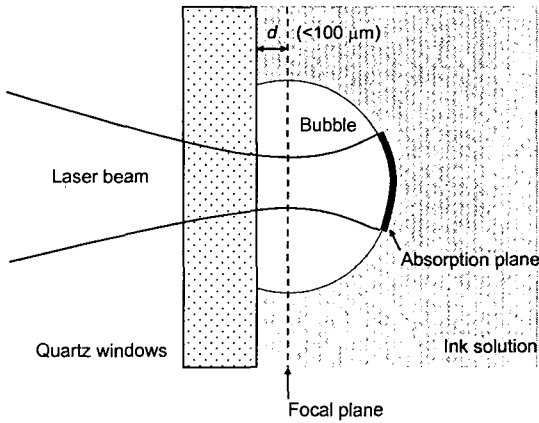


Fig. 13 Bubble formation on the quartz window by the Ar ion laser beam

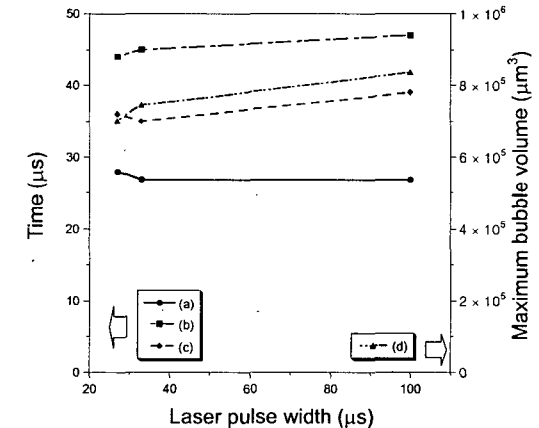
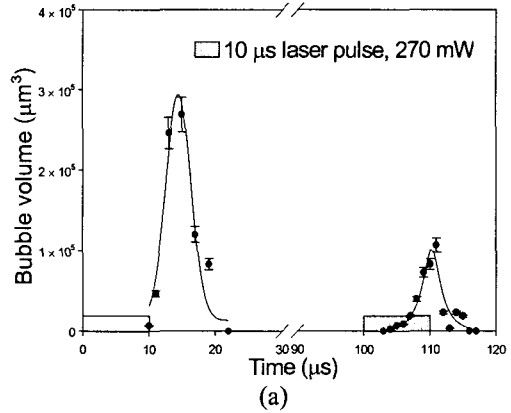


Fig. 14 Dependence of bubble characteristics for various laser pulse widths (ink concentration = 50 % by volume, laser power = 610 mW): (a) bubble-incipiencence time, (b) bubble-collapse time, (c) time to reach the maximum bubble size, and (d) maximum bubble volume

과를 관찰할 수 없었다.

5.4 레이저 펄스 폭에 따른 영향

공급되는 레이저의 펄스 폭이 변화할 때 나타나는 기포의 거동 특성을 분석하였다. τ 보다 긴 펄스 폭 (100 μs)을 지나는 레이저 빔이 공급되었을 때 나타나는 기포의 거동이 Fig. 11 에 나타나 있다. 이 실험조건에서 τ 는 약 27 μs 이었다. 본 실험에서 기포의 최소 생성 시간은 Fig. 6 에서 나타난 것에 비해서 상대적으로 길다. 레이저 펄스 폭에 따른 영향을 조사하는 과정에서 사용된 광학 장치들의 설정이 다소 바뀌어 열유속이 다소 낮아졌기 때문이다.

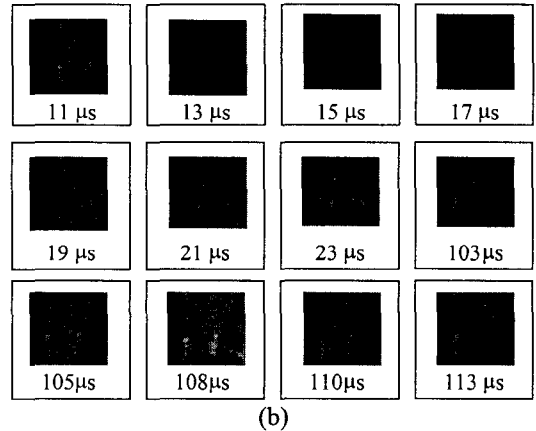


Fig. 15 Bubble generation by double laser pulses: (a) variation of bubble volume with time, and (b) bubble images at various delay times (interval between two laser pulses=100 μs)

Fig. 12 에는 생성된 기포의 부피 변화가 나타나 있다. Fig. 12(a)에 나타난 것과 같이 레이저 펄스 폭이 기포의 최소 생성 시간과 유사할 때는 반구 형태의 하나의 기포가 성장하고 소멸하는 현상이 발생하게 된다. 반면, 레이저 펄스 폭이 τ 에 비해서 상대적으로 매우 클 때 (100 μs), 하나의 기포가 생성된 이후 소멸하고 이후에 작은 기포들이 생성, 소멸을 반복하게 된다. 주목할 점은 기포가 생성되어 성장하는 과정에서 레이저 에너지가 계속해서 공급되지만 기포에 의해 잉크 혼합물에 공급되지 못하고 기포는 더 이상 성장하지 못하는 것이다. 이는 기포에 의해 흡수면이 후진하면서 레이저 플루언스가 낮아지기 때문이다. Fig. 13 에 이러한 효과를 도식적으로 나타내었다. 초기에 생성된 기포가 소멸된 이후에 생성된 기포들이 불완전한 모양 및 크기를 가지는 것은, 반복적인 실험을 통하여 기포의 모양을 촬영하는 실험 기법에

의한 오차에 기인한 것이다.

Fig. 14는 다양한 펄스 폭을 가지는 빔을 조사하였을 때 초기에 생성된 기포의 거동을 최대부피, 최소 성장시간, 기포 소멸시간, 최대크기를 가질 때의 시간 등의 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 기포의 거동 특성이 펄스 폭의 영향을 받지 않고 대체로 일정함을 알 수 있다.

5.5 다중 펄스 조사시의 기포의 거동

잉크젯 프린터에서는 연속적으로 기포 생성이 이루어진다. 따라서, 연속적으로 레이저 빔이 잉크에 조사될 때 나타나는 기포의 거동에 대한 해석이 필요하다. $10 \mu\text{s}$ 의 펄스 폭을 가지는 레이저 빔이 $100 \mu\text{s}$ 의 간격을 두고 잉크에 조사될 때 나타나는 기포의 거동이 Fig. 15에 나타나 있다. Fig. 15(a)에서 보는 것과 같이 두번째 펄스에 의해 생성된 기포의 상대적 부피는 앞서 생성된 기포에 비해서 작은 값을 가진다. 또한 기포의 생성 시간이 첫번째 기포의 경우 $10 \mu\text{s}$ 이나 두번째 기포의 경우 $5 \mu\text{s}$ 부근에서 결정된다. 이는 앞선 펄스로 인한 잔열 효과이며 실제 프린터의 구동에서는 액적 토출로 인한 냉각으로 인해 그 효과가 본 연구와 같이 뚜렷하지 않을 것으로 보인다. Fig. 15(b)에서 보는 것과 같이 연속되는 펄스에 의해서 생성된 기포의 형태는 앞서 생성된 반구형의 기포와는 달리 다소 불규칙한 모양을 가진다. 반복적인 실험 결과 처음으로 생성된 기포는 매우 안정적인 형태와 크기를 유지하는 반면 이후 생성되는 기포는 이전에 생성된 기포의 영향으로 다소 불안정한 형태를 지닌다. 이는 펄스와 펄스간의 간격이 더 짧아질수록 더욱 심화되는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ 의 출력 밀도를 가지는 펄스 레이저 가열 시 발생하는 기포의 거동을 실험적으로 해석하였다. 상업적으로 이용되는 잉크의 광학적 특성을 측정된 결과 $400\sim 500 \text{ nm}$ 의 파장 범위에서 잉크가 높은 흡수율을 가짐을 알 수 있었다. 기포 생성 실험을 통하여 488 nm 레이저의 경우 약 $5 \mu\text{J}$ 의 에너지를 $10 \mu\text{s}$ 의 시간 이내에 공급할 때 $100 \mu\text{m}$ 지름의 기포가 생성이 가능함을 확인하였다. 이러한 기포의 생성, 성장, 소멸 특성은 기존의 저항 발열체를 이용하여 만들어지는 기포의 특성과 비교하였을 때, 그 시간적, 공간적 특성 부분에서 대체로 유사하였다. 그러나, 레이저를 이용한 기포 생성의 경우, 기포

가 성장함에 따라 레이저 빔을 차단하게 되므로 일정 시간 이상 레이저 에너지를 계속해서 공급하더라도 기포가 더 이상 성장하지 않고 생성되는 기포의 거동이 일정한 특성을 보였다. 본 연구 결과는 레이저 직접 가열 방식을 액적 토출에 적용하는 것이 기술적으로 가능함을 보여준다. 하지만 상용화를 위해서는 액적 토출 시스템을 이용한 추가적인 최적화 연구와 저가 광원의 개발이 요구된다고 하겠다.

후 기

본 연구는 핵심연구개발사업과 마이크로열시스템 ERC의 부분적인 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Maximovsky, S. N. and Radutsky, G. A., 2000, US Patent 6,056,388.
- (2) Maximovsky, S. N. and Radutsky, G. A., 2001, US Patent 6,231,162 B1.
- (3) Maximovsky, S. N. and Radutsky, G. A., 2001, US Patent 6,270,194 B1.
- (4) Maximovsky, S. N. and Radutsky, G. A., 2001, US Patent 6,330,857.
- (5) Nemoto, K., Matsuda, O. and Doi, M., 1998, US Patent 5,713,673.
- (6) Endo, I., Sato, Y., Saito, S., Nakagiri, T. and Ohno, S., 1988, US Patent 4,723,129.
- (7) Kohyama, M., 1991, US Patent 5,021,808.
- (8) Asai, A., Hara, T. and Endo, I., 1987, "One-Dimensional Model of Bubble Growth and Liquid Flow in Bubble Jet Printers," *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol. 26, pp. 1794~1801.
- (9) Asai, A., 1991, "Bubble Dynamics in Boiling Under High Heat Flux Pulse Heating," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 113, pp. 973~979.
- (10) Asai, A., 1989, "Application of the Nucleation Theory to the Design of Bubble Jet Printers," *Jap. J. Appl. Phys.*, Vol. 28, pp. 909~915.
- (11) Kim, D., Ye, M. and Grigoropoulos, C. P., 1998, "Pulsed Laser Induced Ablation of Absorbing Liquids and Acoustic-Transient Generation," *Appl. Phys. A*, Vol. 67, pp. 169~181.
- (12) Shangguan, H., Casperson, L. W., Paisley, D. L. and Prael, S. A., 1998, "Photographic Studies of Laser-Induced Bubble Formation in Absorbing Liquids and on Submerged Targets: Implications for Drug Delivery with Microsecond Laser Pulses," *Optical Eng.*, Vol. 37, pp. 2217~2226.
- (13) Turovets, I., Palanker, D., Kokotov, Y., Hemo, I. and Lewis, A., 1996, "Dynamics of Cavitation Bubble

- Induced by 193 nm ArF Excimer Laser in Concentrated Sodium Chloride Solutions," *J. Appl. Phys.*, Vol. 79, pp. 2689~2693.
- (14) Tomita, Y., Shima, A. and Sato, K., 1990, "Dynamic Behavior of Two-Laser-Induced Bubbles in Water," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 57, pp. 234~236.
- (15) Ward, B. and Emmony, D. C., 1990, "Conservation of Energy in the Oscillations of Laser-Induced Cavitation Bubbles," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 88, pp. 434~441.
- (16) Vogel, A., Lauterborn, W. and Timm, R., 1989, "Optical and Acoustic Investigations of the Dynamics of Laser-Produced Cavitation Bubbles Near a Solid Boundary," *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, pp. 299~338.
- (17) Carey, V. P., 1992, *Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena*, Hemisphere Pub. Corp., Washington, D.C., pp. 192~198.
- (18) Rayleigh, R., 1917, "On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity," *Philos. Mag.*, Vol. 34, pp. 94~98.