신개념 프린트 헤드 개발을 위한 펄스 레이저 가열에 의해 생성된 기포의 거동 해석

Analysis of Bubble Dynamics Induced by Pulsed-Laser Heating of Ink as a Method to Develop Novel Print Heads

포항공과대학교 기계공학과 장덕석, 홍종간, 김동식
삼성 종합기술 연구원 MEMS Lab 좌성훈

I 서 론

잉크젯 프린터의 액적 생성 방법 중, 마이크로 저항 히터를 이용한 기포 생성을 통하여 피코리터 수준의 액적을 토출하는 기법이 최근까지 주류를 이루고 있다 그러나 저항 히터를 이용한 방법은 잉크 가열 시에 발생한 열이 헤드 주변부에 잔류하여 냉각에 소요되는 시간이 길다 따라서 액적의 토출 주기가 10~20 kHz 정도로 제한되며, 그 출력 속도가 레이저 프린팅 방식에 비해서 매우 낮다. 최근 보다 높은 수준의 프린팅 속도를 구현하기 위해서 여러 가지 새로운 기법들이 연구되고 있다 레이저를 이용한 잉크의 직접 가열 방법 [1-7]은 잉크가 레이저 에너지를 직접 흡수하여 기포가 생성되므로 헤드 부분의 온도 상승이 기존의 저항 발열체 방식에 비해 적어, 잉크의 가열 및 헤드 냉각에 있어 높은 효율을 낼 수 있다 (Fig 1) 그러나 최근까지 소개된 기법들은 단순한 개념에 기반한 것으로 잉크와 레이저 빔의 상호작용에 의한 현상을 명확히 규명하지 못하고 있다 본 연구에서는 잉크에 레이저 빔이 조사되었을 시에 발생하는 기포 생성 현상을 레이저 섬광사진법을 이용하여 가시화하고, 기포의 거동을 실험적으로 규명하였다 저항 히터를 통한 기포 생성 현상들은 이론 및 실험을 통하여 많이 연구 되어진 반면, [8-10] 레이저를 이용한 기포생성 현상은 그 연구가 매우 미흡한 실정이다 액체의 어블레이션 한계를 넘는 펄스 레이저 빔의 조사에 의한 기포 생성과 관련된 연구는 다소 있지만, [11-16] 잉크젯 프린팅에 적용 가능한 조사도(10^4~10^5 W/cm^2)를 가지는 레이저 플루언스 영역에 대한 연구는 전무한 실정이다 따라서 본 연구는 위 에너지 영역의 레이저 플루언스를 가지는 레이저 빔을 잉크에 조사하였을 때 발생하는 기포의 거동을 규명하는데 그 목적을 두고 있다

II. 잉크의 흡광 특성 및 기포 생성 가시화 실험

레이저 빔을 이용하여 잉크에 기포를 생성시키기 위해서는 잉크의 레이저 빔의 흡수 정도를 정확히 예측하는 것이 중요하다 이를 위해서 잉크의 빛의 흡수 특성을 빛의 파장 및 잉크의 색깔에 따라 조사하였다 상용적으로 이용되는 붉은색, 푸른색, 노란색, 검은색의 잉크젯 프린터용 잉크(JETRON KOREA LTD)를 이용하여 흡광 실험을 수행하였다 Fig 2 와 같은 흡광 실험 장치를 이용하여 잉크의 빛의 흡수 정도를 실험하였다 5mm 의 두께를 가지는 유리 큐벳에 잉크를 담고 할로겐 램프를 조사하고 이를 통과한 이후의 빛의 세기를 분광기를 이용하여 400 nm 에서 850 nm 까지 측정한다. 잉크 대신 물을 사용하여 원래의 빛의 강도를 측정하여 잉크를 통과한 이후의 빛의 흡수 정도를 상대적으로 비교하여

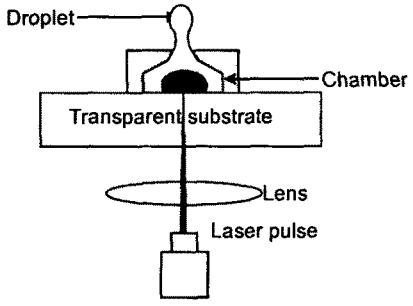

Fig 1 Concept of droplet ejection by direct laser heating of absorbing liquid in a chamber

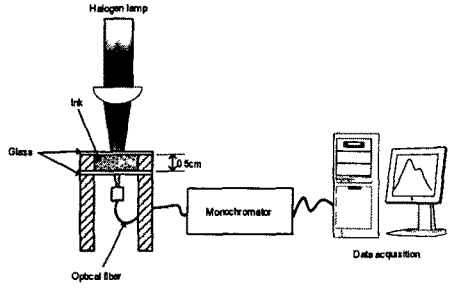

Fig 2 Schematic diagram of experimental setup for absorption-spectrum measurement

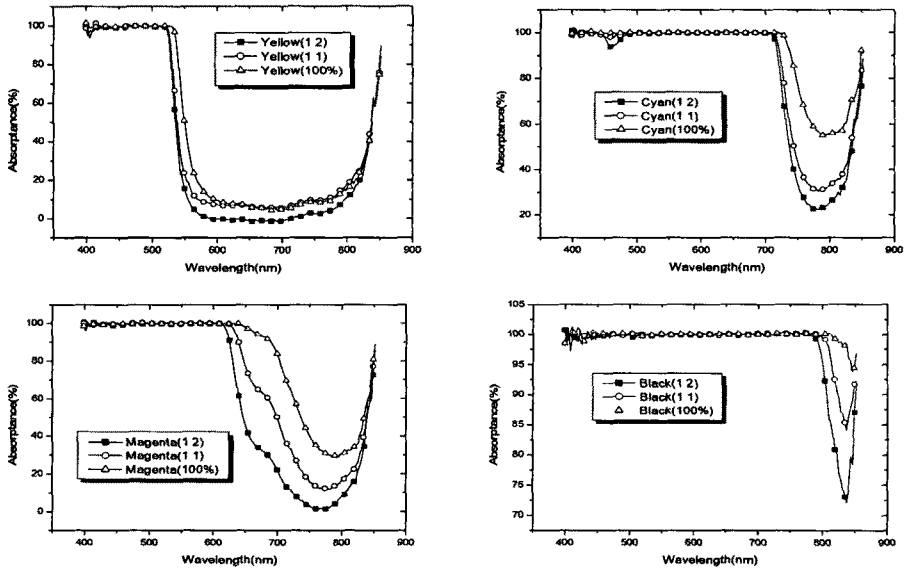

Fig 3 Transmission spectrum for various ink colors and concentrations

빛의 흡광 정도를 측정하였다

레이저 가열 시에 발생하는 기포의 거동을 관찰하기 위해서 레이저 섬광사진법(laser-flash photography)을 이용하였다 본 연구에 이용된 가시화 장치는 기존의 타 연구에서 이용된 것과 유사하다 [11] 연속파 Ar 이온 레이저(파장 488 nm, 최대파워 610 mW)를 AOM (acousto-optic modulator)을 이용하여 일정 펄스 폭을 가지는 펄스 형태로 변조하여 증류수와 잉크의 혼합 액체에 조사한다 Ar 이온 레이저 조사 후 일정 시간 후 N_2-pumped 색소 레이저(파장 640 nm 또는 440 nm, 펄스 폭 3 ns)를 Ar 레이저 빔이 집광된 곳을 통과하도록 조사하고 CCD 카메라를 이용하여 최종 이미지를 얻는다 색소 레이저와 Ar 이온 레이저의 조사 간격을 변화시키면서 반복실험을 하게 되면 수 ns 의 시간 분해능을 가지는 이미지를 얻을 수 있게 된다 Ar 이온 레이저는 50 mm 의 초점 거리를 가지는 렌즈를 이용하여 집광하였으며 이때 이론적인 초점면에서의 빔의 지름은 26 μm 이다

III. 실험결과 및 고찰

잉크의 색, 농도 및 빛의 파장에 따른 흡수 스펙트럼이 Fig 3 에 나타나 있다 검은색 잉크의 경우 농도에 무관하게 가시광선 영역에서 근접 적외선 영역까지 흡수 정도가 매우 높은 반면에 노란색의 잉크의 경우 400 nm 에서 500 nm 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 흡수도를 가진다 흡수 특성 실험에 사용한 유리 큐벳의 두께는 5 mm 로 빛의 침투 깊이에 비해서 상대적으로 매우 두껍다 정확한 잉크의 흡수도를 알기 위해서는 잉크의 흡광계수(κ)을 알 필요가 있다 이를 위해서 150 μm 의 두께를 가지는 잉크 막을 만들어 488 nm 에 대해서 흡수 실험을 수행하였다 본 기포 생성 실험에서 주로 사용된 붉은색 잉크의 경우, 부피 농도 25 %와 33 %에 대한 혼합 액체에 대한 흡광 계수 κ는 1 04 × 10^4 과 1 10 × 10^4 m^{-1} 으로 나타났다

레이저 빔을 물과 붉은색 잉크의 혼합용액에 조사하였을 때 일정시간(time for bubble incipience, τ)이 경과한 후 하나의 기포가 반구형의 형태로 성장하게 된다 33 %의 부피 농도를 지니는 붉은색의 잉크에 레이저 빔 조사되었을 때의 생성되는 기포의 모습이 Fig 4 에 나타나 있다 레이저 빔의 조사 시간이 기포 생성 최소 요구 시간인 τ 보다 길 때, 약 100 μm 의 지름을 가지는 반구형의 기포가 생성된다 빔의 조사 시간이 τ 보다 짧을 때에는 빔의 조사 지점에 수 μm 수준의 기포의 생성되지만 더 이상 성장하지 못하고 빔 조사가 끝남과 동시에 소멸된다 9 μs 의 펄스 폭을 가지는 레이저 빔을 33 %의 잉크 용액에 조사하였을 때 생성되는 기포의 부피가 Fig 5 에 나타나 있다 본 결과에 나타난 기포의 부피는 가시화 실험에 의한 사진에 의해서 도출된 것으로 환산 과정에서 ±8 %의 오차를 가진다

기포의 생성 시간, 크기 및 부피의 변화를 액체에 공급되는 레이저의 파워에 따라 조사하였다 Fig 6(1)에는 100 mW 에서 610 mW 까지 레이저 파워를 변화시켰을 때 시간에 다른 기포의 부피 변화를 보여주고 있다 그림에서 볼 수 있듯이 기포의 생성 시간과 최대 부피는 레이저 파워가 증가함에 따라

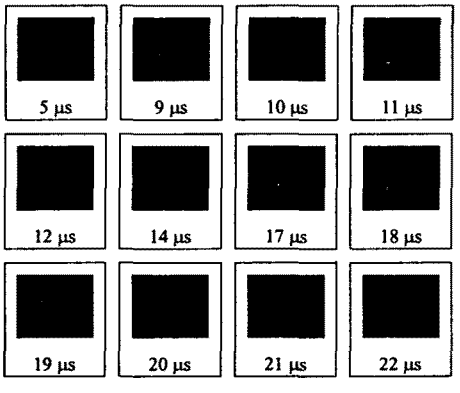

Fig 4 Shadowgraphs of bubbles at various delay times (Ar+ laser pulse width 9 μs, laser power 500 mW) The image (horizontal) size is 220 μm

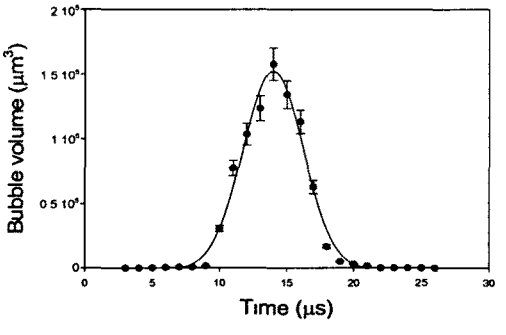

Fig 5 Variation of bubble volume with time for a typical heating condition laser power 500 mW, pulse width 9 μs, 33 % volume concentration (magenta)

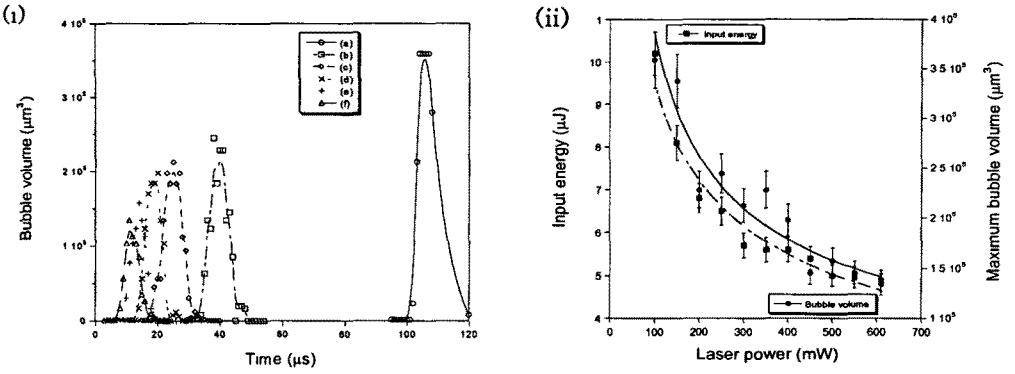

Fig 6 (i)Variation of bubble volume with time (a) Ar ion laser power=100 mW, pulse width=105 μs, (b) 200mW, 35μs, (c) 300 mW, 20 μs, (d) 400 mW, 14 μs, (e) 500 mW, 9 μs, and (f) 610 mW, 7 μs Bubbles are generated in the ink solution (33 % volume concentration) and (ii) Minimum energy for bubble inception and the maximum bubble volume for various laser powers

감소한다 본 실험에서 레이저의 펄스 폭은 기포의 안정적인 생성을 위하여 최소 생성 시간(τ)에서 0 5 ~1 μs 을 초과하여 설정하였다 일반적인 열저항 히터를 사용하였을 때 나타나는 기포의 거동(시간에 따른 기포의 부피 변화) 또한 이와 매우 유사하였다 [8-10] 한 예로, 열저항 히터를 사용하여 메탄올 액체에 기포를 생성하는 실험에서는 기포 생성에 소요되는 시간이 약 5 μs 이고 생성 후 소멸까지 걸리는 시간이 10 μs 이였다 [9] 이때 공급된 총 에너지는 3 μJ 이였으며, 기포의 최대 반지름은 70 μm, 열유속은 5 1 x 10^3 W/cm^2 였다 기포 생성에 들어가는 최소 에너지와 레이저 파워에 대한 관계가 Fig 6(ii)에 나타나 있다 이때 액체에 공급된 에너지는 안정적인 기포 생성을 위하여 약간 초과되어 공급되었으며, 약 ±5 %의 오차를 지닌다 Fig 6(ii)에는 공급된 에너지와 더불어 기포의 최대 부피도 함께 나타나 있다 그림에서 볼 수 있듯이 레이저 파워가 증가함에 따라서 기포 생성에 요구되는 최소 에너지는 감소하게 되고 이에 따라서 생성되는 기포의 최대 크기 또한 함께 감소하게 된다

열유속의 변화에 따른 기포 생성의 최소 요구 시간(τ)의 관계가 Fig 7 에 나타나 있다 이때 열유속은 공급되는 레이저 빔의 에너지 분포가 가우시안 형태를 지녔다고 가정하고, 이론적인 빔의 지름(26 μm)을 사용하여 계산하였다 따라서 열유속의 다소 높게 계산되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 열유속과 기포의 최소 생성시간은 $\tau \propto q^{-1.39}$의 상관 관계를 가진다 이러한 상관 관계는 레이저의 파워를 증가시키거나 초점면에서의 면적을 좁혀 열유속을 증가시킬 때 기포의 생성 시간을 줄일 수 있음을 잘 보여주고 있다 레이저와 열유속의 상관 관계에서 나타나는 -1 39 의 지수는 일반적인 열저항 히터에서 나타나는 관계 $\tau \propto q^{-1.99}$보다 낮은 값이다 [10] 이는, 열저항 히터의 경우 공급되는 열의 침투 깊이 l_t 는

$$l_t \sim \sqrt{\alpha t_0} = 0.9\ \mu m, \qquad (\alpha \text{ thermal diffusivity, } t_0 \text{ heating time})$$

인 반면, 33%의 농도를 가지는 붉은색 잉크의 경우, Ar 이온 레이저에 의한 열 침투 깊이 l_o

$$l_o \sim \frac{1}{\kappa} = 91\ \mu m,$$

가 매우 크기 때문이다 따라서 레이저에 의해서 가열하는 액체의 부피가 열저항 히터에 비해서

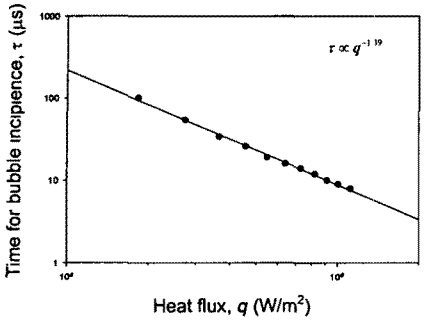

Fig 7 Effect of heat flux on bubble incipience time

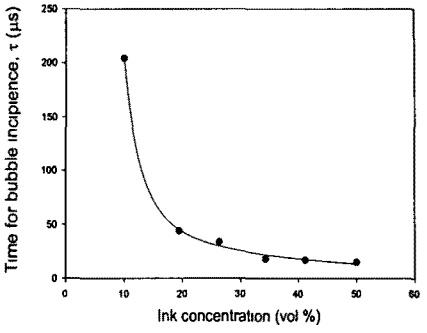

Fig 8 Bubble incipience time for various ink concentrations for magenta ink (laser power 270mW)

상대적으로 크고, 열유속과 기포 생성 시간의 관계가 열저항 히터에 비해서 낮은 값을 가지게 된다 앞에서 말했듯이 본 실험에서는 기포의 가시화를 위해 잉크에 물을 첨가한 혼합용액을 사용하여, 빛의 흡수 정도가 순수한 잉크에 비해서 매우 낮으므로, 이와 같은 결과가 나타났으며 잉크의 농도가 높아질 경우에는 변화하게 된다 잉크의 농도가 변화할 때, 액체가 레이저 에너지를 흡수하는 정도는 Fig 3 에서도 나타나 있듯이 크게 변화하게 되고, 이에 의해 최소 기포 생성 시간 또한 변화하게 된다 붉은색 잉크의 농도 변화에 따른 기포의 최소 생성 시간의 변화 정도가 Fig 8 에 나타나 있다 잉크의 농도가 증가할수록 기포의 최소 생성 시간은 감소함을 볼 수 있다 잉크의 농도가 증가할 때 잉크의 빛의 흡수 정도가 증가하게 되므로 기포의 생성 시간이 감소하게 된다 실험은 잉크의 농도가 50%를 넘어갈 때 가시화가 불가능하여 이 농도까지 실험을 수행하였다 노란색 계열의 잉크를 이용하여 이와 동일한 실험을 수행한 결과, 그 절대적인 시간은 변화하였지만 농도와 시간과의 관계는 매우 유사하였다 270mW 의 동일한 레이저 파워에 대해서 41%와 100%의 노란색 잉크에 기포를 생성할 때 최소 생성 시간은 각각, 90 μs 과 20 μs 으로 농도가 증가함에 따라서 감소하였다

기포생성의 특성을 다양한 펄스 폭을 지니는 레이저 빔에 따라 분석하였다 최소 기포생성 시간보다 긴 펄스 폭을 지니는 레이저 빔이 공급되었을 때 나타나는 기포의 성장 특성이 Fig 9 에 나타나 있다 이 실험 조건에서 기포의 최소 성장 시간 τ는 약 27 μs 이였다 본 실험에서 기포의 최소 생성 시간은 Fig 7 에서 나타난 것에 비해서 상대적으로 길다 레이저 펄스 폭에 다른 영향을 조사하는 과정에서 사용된 광학 장치들의 설정이 다소 변경되어 레이저 초점면의 변화가 있어 열유속이 다소 낮아졌기 때문이다 Fig 9 (b)와 (c)에는 27 μs 과 100 μs 의 펄스 폭을 가지는 빔이 조사되었을 때 발생하는 기포의 시간에 따른 부피 변화가 나타나 있다 Fig 9(b)에는 조사되는 레이저 빔의 펄스 폭이 최소 기포 생성 시간 τ보다 조금 길 때(0 5~1 μs) 하나의 기포가 성장하는 것을 보여주고 있다 반면, 레이저 펄스 폭이 100 μs 으로 τ에 비해서 상대적으로 매우 클 때, Fig 9(c)에서 보는 것과 같이 초반에 (b)와 같이 하나의 기포가 생성된 이후 소멸하고 이후 작은 기포들이 생성, 소멸을 반복하게 된다 주목할 점은 기포가 생성되어 성장하는 과정에서 레이저 에너지가 계속해서 잉크 혼합물에 공급되지만 기포는 더 이상 성장하지 못하고 일정 크기를 성장한 후 소멸한다는 것이다 초기에 생성된 기포가

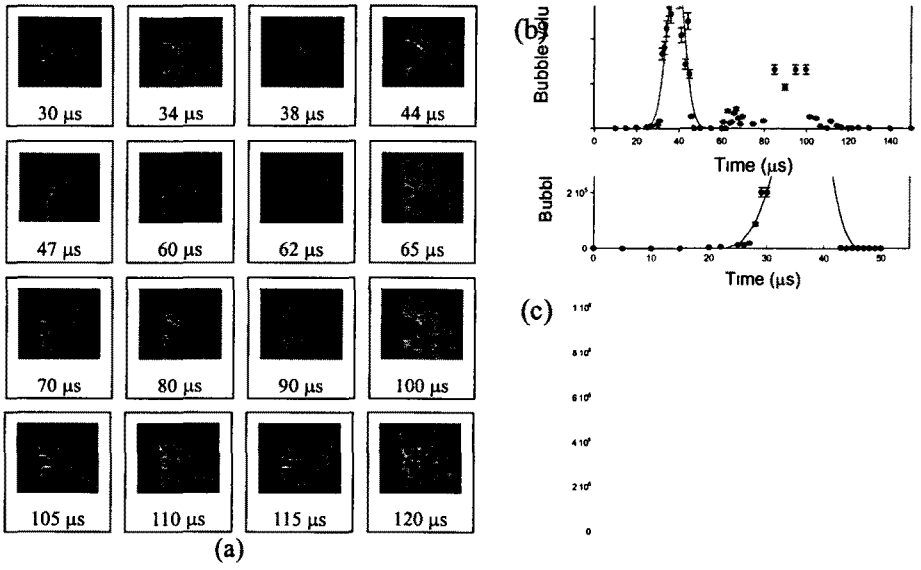

Fig 9 (a) Shadowgraphs of bubbles at various delay times (Ar ion laser pulse width 100 μs, laser power 605 mW) The image (horizontal) size is 220 μm Variation of bubble volume with time for a typical heating condition laser power 605 mW, pulse width (b) 27 μs and (c) 100 μs, 50 % volume concentration (magenta)

소멸된 이후에 생성된 기포들이 불안정한 모양 및 크기를 가지는 것인 본 연구에 사용된 실험 기법이 연속적인 기포를 촬영한 것이 아니라, 반복적인 실험을 통하여 기포의 모양을 촬영한 것이므로 일정한 성장 곡선을 유지하지 못하게 된 것이다

Fig 10(i)에는 다양한 펄스 폭을 가지는 빔을 조사하였을 때 초기에 생성된 기포의 거동을 최대부피, 최소 생성 시간, 기포 소멸시간, 최대크기를 가질 때의 시간 등이 나타나 있다 그림에서 볼 수 있듯이 기포의 거동 특성이 펄스 폭에 영향을 받지 않고 어떤 특수한 값으로 수렴함을 알 수 있다 이는 다음과 같이 해명될 수 있다 Fig 10(ii)에 나타나 있듯이 액체에 조사되는 레이저 빔은 일정한 에너지 분포를 가지지 못하며 전파함에 따라서 그 에너지 분포가 변화하게 된다 렌즈를 이용하여 빔을 집광할 시, 빔은 전파하면서 그 플루언스가 달라지게 되는데, 레이저 빔을 흡수하는 부분은 기포 내가 아닌 잉크의 혼합 용액과 기포의 계면이다 따라서, 기포가 성장함에 따라서 에너지 흡수면은 이동하게 되며, 레이저 플루언스 값은 낮아지게 된다 이로 인해서 레이저 에너지가 계속해서 공급되더라도 기포는 더 이상 성장하지 못하고 다시 수축, 소멸하게 된다

잉크젯 프린터에서는 연속적으로 기포 생성이 이루어진다 따라서, 연속적으로 레이저 빔이 잉크에 조사될 때 나타나는 기포의 거동에 대한 해석이 필요하다 10 μs 의 펄스 폭을 가지는 레이저 빔이 100 μs 의 간격을 두고 잉크에 조사될 때 나타나는 기포의 거동이 Fig 11 에 나타나 있다 Fig 11(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 μs 이나 두번째 기포의 경우 5 μs 부근에서 결정된다 이는 잉크젯 프린터의 구동 속도를 더욱 높일 수 있음을 보여주고 있다 그러나,

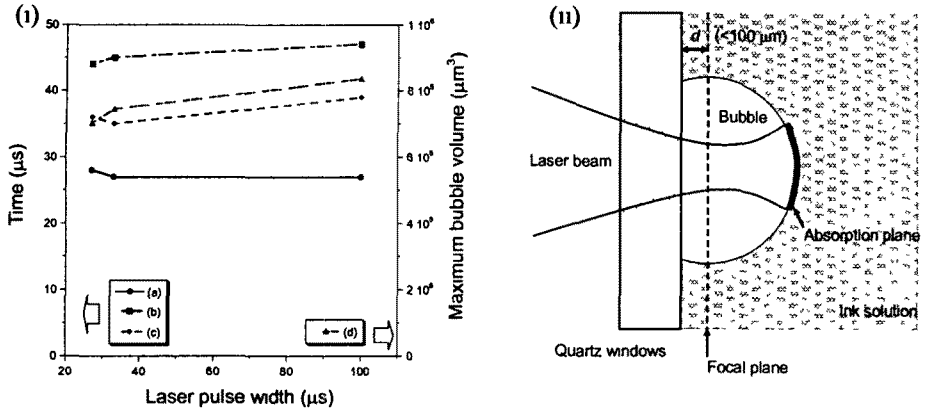

Fig 10 (i) Dependence of bubble characteristics for various laser pulse widths (ink concentration = 50 % by volume, laser power = 610 mW) (a) bubble-incipience time, (b) bubble-collapse time, (c) time to reach the maximum bubble size, and (d) maximum bubble volume (ii) Bubble formation on the quartz window by the Ar ion laser beam

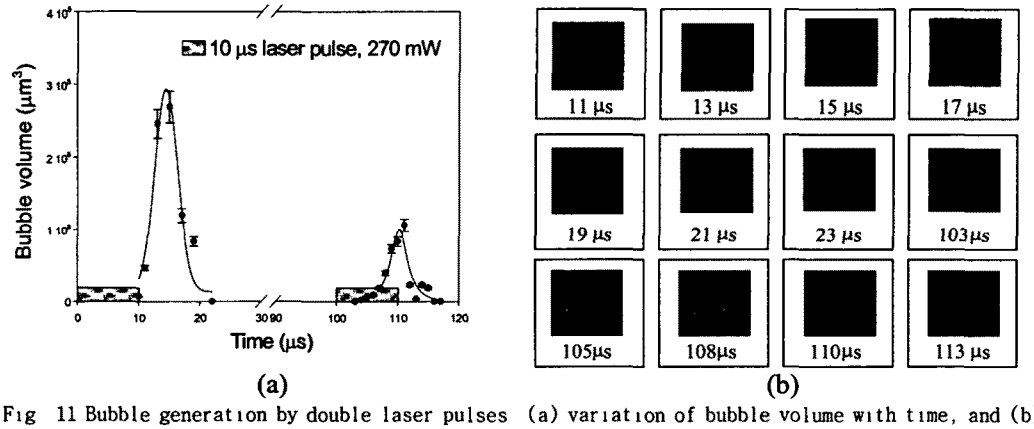

Fig 11 Bubble generation by double laser pulses (a) variation of bubble volume with time, and (b) bubble images at various delay times (interval between two laser pulses=100 μs)

Fig 11(b)에서 보는 것과 같이 두번째 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 다소 불안정한 형태를 지닌다 이는 펄스와 펄스간의 간격이 더 짧아질수록 더욱 심화되는 것으로 나타났다

IV. 결 론

본 연구에서는 10^4 ~ 10^5 W/cm^2 의 출력 밀도를 가지는 펄스 레이저 가열 시 발생하는 기포의 거동을 신개념 프린터 헤드에 적용하기 위한 실증적인 실험 결과를 처음으로 도출하였다 상업적으로 이용되는 잉크의 광학적 특성을 측정한 결과 400~500 nm 의 파장 범위에서 잉크가 높은 흡수율을 가짐을 알 수 있었다 기포 생성 실험을 통하여 488 nm 레이저의 경우 약 5 μJ 의 에너지를 10 μs 의 시간 이내에

공급할 때 100 ㎛ 지름의 기포가 생성이 가능함을 확인하였다 이러한 기포의 생성, 성장, 소멸 특성은 기존의 저항 발열체를 이용하여 만들어지는 기포의 특성과 매우 유사하였다 그러나, 레이저를 이용한 기포 생성 시 기포가 성장함에 따라 레이저 빔을 차단하게 되므로 일정시간 이후에는 레이저 에너지를 계속해서 공급하더라도 기포가 더 이상 성장하지 않았다 본 연구 결과는 레이저 직접가열방식이 신개념 프린트 헤드에 이용될 수 있음을 기술적으로 증명해 준다 하지만 상용화를 위해서는 레이저의 파장, 조사도, 잉크 농도의 영향에 관한 보충 실험과 더불어 저가 광원의 개발이 요구된다

후기

본 연구는 핵심연구개발사업과 마이크로열시스템 ERC 의 부분적인 지원으로 수행되었다

V. 참고문헌

1 S N Maximovsky, et al, US Patent 6,056,388, (2000)

2 S N Maximovsky, et al, US Patent 6,231,162 B1, (2001)

3 S N Maximovsky, et al, US Patent 6 270,194 B1, (2001)

4 S N Maximovsky, et al, US Patent 6,330,857, (2001)

5 K Nemoto, et al, US Patent 5,713,673, (1998)

6 I Endo, et al, US Patent 4,723,129, (1988)

7 M Kohyama, US Patent 5,021,808, (1991)

8 A Asai, et al One-dimensional model of bubble growth and liquid flow in bubble jet printers, Jap J Appl Phys , 26, pp 1794-1801, (1987)

9 A Asai, "Bubble dynamics in boiling under high heat flux pulse heating, Trans ASME, J Heat Transfer, 113, pp 973-979, (1991)

10 A Asai Application of the nucleation theory to the design of bubble jet printers, Jap J Appl Phys , 28, pp 909~915, (1989)

11 D Kim, et al Pulsed laser induced ablation of absorbing liquids and acoustic-transient generation, Appl Phys A, Vol 67, pp 169~181, (1998)

12 H Shangguan, et al Photographic studies of laser-induced bubble formation in absorbing liquids and on submerged targets implications for drug delivery with microsecond laser pulses, Optical Eng , 37, pp 2217~2226, (1998)

13, I Turovets, et al Dynamics of cavitation bubble induced by 193 nm arf excimer laser in concentrated sodium chloride solutions, J Appl Phys , 79,pp 2689~2693, (1996)

14 Y Tomita, et al Dynamic behavior of two-laser-induced bubbles in water, Appl Phys Lett , 57, pp 234~236 (1990)

15 B Ward, et al Conservation of energy in the oscillations of laser-induced cavitation bubbles, J Acoust Soc Am , 88, pp 434~441, (1990)

16 A Vogel, et al Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary, J Fluid Mech , 206, pp 299~338, (1989)