

Nd:YAG 레이저에 의한 다층 박막의 미소 점 마킹

김현진

조선대학교 대학원 광응용공학과
Ⓣ 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

신용진[†]

조선대학교 자연과학대학 물리학과
Ⓣ 501-759 광주광역시 동구 서석동 375

(2004년 1월 19일 받음, 2004년 6월 8일 수정본 받음)

콤팩트디스크(CD-R; Compact Disk Recordable)를 성분별로 분리하여 제작하고, 다층 박막 구조를 만들어서 레이저 빔의 에너지를 변화시켜 가면서 조사하여 각 성분 층에서의 최적 미소 점 마킹 조건과 흡 형성 과정에 관하여 연구하였다. 본 연구는 Q-스위치 Nd:YAG 레이저를 이용하여 준비된 각 시료의 표면에 27~373 mJ의 빔을 80 μm의 점적 크기로 조사하여 샘플에 형성된 흡 형태를 광학현미경(OM; Optical Microscope)과 광 결맞음 단층촬영기(OCT; Optical Coherence Tomography)로 비교·관찰하여 미소 점 마킹의 형성 과정을 분석하였다. 다층 박막에서 용융된 기판 층은 짧은 시간동안 충분한 열 흐름이 발생하여 증배의 형성을 야기하며, 반사 층과 염료 층 사이에 흡수된 에너지는 염료를 용융 시키고 체적을 증가시켰으며, 증배가 식으면서 표면장력의 영향 및 레이저 빔에 의한 순간적인 시편의 온도상승으로 기화와 반동압력에 의한 질량흐름 때문에 두 층의 경계면에서 흡과 외륜의 발생을 설명할 수 있었다. 따라서 다층 박막에서의 미소 점 마킹의 형성 과정은 표면장력, 용융 점성력, 층 두께, 다층 박막 성분 물질의 물리화학적·광학적 성질과 관계가 있음을 알 수 있었다.

주제어 : Spot marking, multilayer thin films, Nd:YAG laser, optical coherence tomography(OCT).

I. 서 론

레이저(LASER; Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)가 광 메모리, 광 통신, 광소자, 광화학, 광 컴퓨터 및 의료기기, 홀로그램을 이용한 다양한 레이저 디스플레이 등의 차세대 산업으로 전망되는 광기술분야에서 획기적인 첨단기기로 사용되고 있다. 최근에는 전자정보 처리 시스템 분야의 전망성이 높아짐에 따라 레이저가 광 저장기술에 응용되기 시작하여 레이저와 매질과의 상호작용에 따른 재료의 물리화학적 반응, 반사율, 광학적 특성 등을 이용한 광 디스크가 차세대 기록매체로 각광받게 되었다. 따라서 광 기록매체의 기록메커니즘에 대한 연구가 활발해지기 시작하면서 다양한 변형 효과에 의한 기록 방법들이 제안되었다.^[1,2] 더 나아가 궁극적인 물질의 특성들에 대한 현상들을 이해하기 위해서 레이저 빔과 물질의 상호작용에 대한 구체적인 연구가 이루어지고 있다.^[3] 그러나 이러한 변형 효과 및 상호작용은 간접적인 수치 해석적 방법 등에 의해 단지 변형들이 예측되었을 뿐, 변형된 현상들을 측정 할 수는 없었다.

따라서 본 연구에서는 광 저장매체 중의 하나인 콤팩트디스크(CD-R; Compact Disk Recordable)의 폴리카보네이트(PC; polycarbonate), 시아닌(cyanine), 프탈로시아닌(phthalocyanine) 및 은(Ag)을 성분별로 분리하여 제작하고, 다층막 구조를 만

들어서 레이저 빔을 조사하여, 각 성분 층에서의 미소 점 마킹에 대한 최적 조건과 흡 형상을 체계적으로 측정하여 흡 형성 과정을 분석하고자 하였다.

다층 박막의 미소 점(80 μm) 마킹은 Q-스위치 펄스 변조 Nd:YAG(Multi모드 80 W, TEM₀₀모드 20 W)를 이용하여 폴리머 층(PC; polycarbonate) 표면으로부터 반사 빔의 강도와 폴리머 층과 염료 층(PC+cyanine, PC+phthalocyanine)의 경계, 염료 층과 반사 층(PC+cyanine+ Ag, PC+phthalocyanine+ Ag)의 경계에서 반사 빔의 강도를 주파수(Frequency)와 효율(Duty)의 변화에 따라 측정하여 최적의 미소 점 마킹 조건들을 얻을 수 있다. 그리고 샘플에 형성된 흡 형태를 광학 현미경(OM; Optical Microscope)과 광 결맞음 단층촬영기(OCT; Optical Coherence Tomography)^[4,5]로 비교·분석하였다. 따라서 미소 점 마킹의 형성과정을 분석함으로써 홀로그램, 반도체 회로기판 등 다양한 레이저를 이용한 초정밀 가공의 가능성을 고찰할 수 있다. 또한 플라스틱 광 저장매체에서 데이터 형성에 관한 연구의 기초자료로 이용할 수 있다.

II. 이론적 배경

2.1. 콤팩트디스크(CD-R)의 구조 및 기록재생 원리

다층막 구조의 광 저장매체(multilayered optical storage) 중의 하나인 콤팩트디스크(CD-R; Compact Disk-Recordable)의 구조를 살펴보면, 그림 1에서와 같이 4개의 얇은 박막으로

[†]E-mail: yshin@chosun.ac.kr

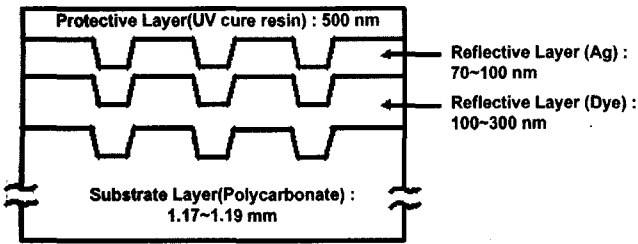


그림 1. 콤팩트디스크(CD-R)의 다층 막 구조.

구성되어 있다. 가장 아래쪽은 기판 층으로 폴리카보네이트가 약 1.2 mm 두께를 가지며 미리 물결모양의 홈이 파여져 있는 부분이다. 두 번째 층은 레이저 빔에 의해 변형되는 기록 층으로 유기염료가 100~300 nm 두께로 코팅되어 있다. 세 번째가 레이저 빔을 반사하기 위한 반사 층으로 Ag, Au, Al 등을 70~100 nm로 증착시킨 부분이다. 이러한 기본구조가 갖춰진 상태에서 반사 층을 보호하기 위해서 UV 락커(lacquer) 보호층이 있다.

CD-R의 기록 원리는 레코더의 픽업(pick up)에 있는 반도체 레이저에서 발광된 빔이 회전하고 있는 CD-R의 아래에서 기판 층을 통과하여 두 번째 층인 기록 층에 그르브(groove)를 따라서 집광을 했다 안 했다는 연속적으로 반복하게 된다. 이때 복합 화합물질인 염료(dye)는 일정 에너지 이상을 받으면 변형을 일으키는 특징을 가지고 있어서 레이저 빔을 받아 변형되어 홈(pit)을 이루는 부분과 받지 않아 원래의 성질을 그대로 갖고 있는 부분으로 나뉘지는데 바로 2진 신호를 기록하는 기본원리이다. 또한 재생 원리인 신호를 읽어 내리는 원리는 간단하다. 플레이어의 픽업에 있는 반도체 레이저는 레코더의 기록 레이저에 비해서 약한 레이저를 이용하는데, 정상 부위와 변형된 염료 부위의 반사율 차이로 재생 원리를 갖는다. 즉, 그르브(groove)와 랜드(land)에서 반사되는 반사 양의 차이에 의해 신호를 해석하게 되는 원리이다. 이렇게 서로 다른 반사광 량을 전기적 신호로 바꾸고 증폭하여 일정값과 비교하고 구분하여 원 신호를 재생하게 되는 것이다.^[6,7]

2.2. 레이저 마킹에 의한 홈(pit) 형성 메커니즘

물질에서의 레이저 마킹은 일반적으로 광학적 흡수, 열 흐름, 질량운동과 같은 세 가지 물리적인 과정을 내포해 고도로 집속된 레이저 빔이 작은 크기의 홈을 만들어 낸다. 극히 짧은 시간 동안에 레이저 빔이 물질에 조사되면 빔은 순간적으로 일부를 반사시키고 나머지 일부는 반사율에 따라 흡수된다.

흡수된 레이저 빔이 열원으로 작용해 물질은 그 열을 흡수하여 녹고, 마침내 빔이 조사된 주위로 열 흐름이 발생한다. 결과적으로 홈 중심의 표면은 함몰되고 홈 주위로 증배(bulge)가 형성된다. 이는 함몰된 표면이 키 홀(keyhole)을 형성해 흑체(black body)와 같은 역할을 하기 때문이다. 레이저 빔의 흡수된 에너지의 일부는 재 복사에 의해 소실되고 나머

지가 물질 내부로 흡수되어 물질의 표면에서부터 내부로 전달된다. 즉, 이러한 열전달에 의해 물질의 변형이 일어나는 것이다. 레이저 빔의 흡수된 에너지는 키 홀과 같은 홈에서 순간적으로 감소되는데 이는 비어람버트(Beer Lambert) 법칙에 의해 $I = I_0 e^{(-\alpha d)}$ 과 같이 지수 함수적으로 감소한다. 여기에서 I_0 는 빔의 조사 강도이고, α 는 선형흡수계수, d 는 깊이이다.^[8] 광학적 흡수에 의한 열 흐름의 영향으로 재료의 표면은 홈과 외륜을 형성하게 되는데, 그 원동력으로 냉각 수축에 의한 형성 및 되튐압력에 의한 형성의 메커니즘을 들 수 있다.

첫째, 냉각 수축에 의한 외륜 형성은 레이저 마킹이 진행되는 동안 온도구배에 의해 야기되는 표면장력의 추진력 하에 용융된 매질의 흐름이 냉각 수축과정을 통해 홈의 외륜과 함몰을 일으킨다. 열팽창으로 인해 표면으로부터 튀어나온 용융된 매질은 열확산에 따라 발생된 체적의 변화, 표면의 냉각수축에 의해 수반되는 일련의 과정들을 포함한다. 그러나 일련의 과정들이 극히 짧은 시간 내에 발생하기 때문에 특징적으로 관찰할 수 있는 실험적 측정이 부족하다. 따라서 근사적인 계산만이 가능하고 진행되는 메커니즘은 그림 2(a)→(b)→(c) 진행과정에서 개략적으로 보여줄 수 있다. 냉각수축에 의한 홈과 외륜의 형성 과정은 거의 동시에 순간적으로 발생하지만 미소한 시간 차이를 두고 순차적으로 발생되어 열 흡수와 흐름 및 전달, 초기 증배, 열 확산에 의한 냉각 수축의 완전 진행으로 분리되는 근사적인 방법을 취한다. 시간 τ 내에 반경 r 과 깊이 h 인 홈을 형성하기 위한 점성 손실 에너지는 $E\eta \approx F \cdot \pi r^3 = (\pi \eta r^4) / (\tau h)$ 과 같다. 여기에서 F 는 표면력으로 단위 면적당 힘이며, η 는 점성도이다.^[6,9] 그리고 점성력은 고온에서 플라스틱 물질에 홈을 형성하는 동안 용융 층의 흐름을 제한하므로 홈 형성 과정에서 발생하는 외륜 형성의 메커니즘이라 말할 수 있다.

둘째, 되튐압력에 의한 외륜 형성은 매우 높은 온도에서 짧은 시간동안 에블레이션(ablation)을 일으키는 점성력 때문에 체적이 감소되고, 물질이 분해 되어 질량운동을 한다. 따라서 점성흐름으로 유도된 에블레이션은 되튐압력에 의해 홈과 외륜을 형성한다. 홈과 외륜을 형성하는 일련의 과정들은 극히 짧은 시간 동안 거의 동시에 일어나는데 레이저빔 조사 시 물질의 순간적인 온도 상승으로 물질을 재구성하는 과정에서 갑작스런 물질의 에블레이션이 발생한다. 이러한 에블레이션에 의한 되튐압력은 측면보다 압력을 적게 받고 있는 표면으로 물질의 질량운동을 일으켜 외륜을 형성시킨다. 레이저 빔 조사 에너지가 증가하면서 용융 층의 두께는 얇아지고 되튐이 작아짐으로써 되튐작용은 점차 감소한다. 이러한 메커니즘을 그림 2(a)→(b)→(d)의 진행과정으로 보여줄 수 있다. 에블레이션에 의한 시료의 운동에너지는 $E_a \approx (F_a \pi r^2 \tau)^2 / (2f \rho \pi r^2 h)$ 와 같다. 여기에서 F_a 는 표면에 작용하는 힘, f 는 홈에서 ablation 현상을 일으키는 체적의 미소량, r 은 홈의 반경, h 는 홈의 깊이이다. 표면장력이 등방적이고 점성을 지배한다면 $E_a \geq (r^6 \eta^2) / (f \rho h^5)$ 를 얻을 수 있

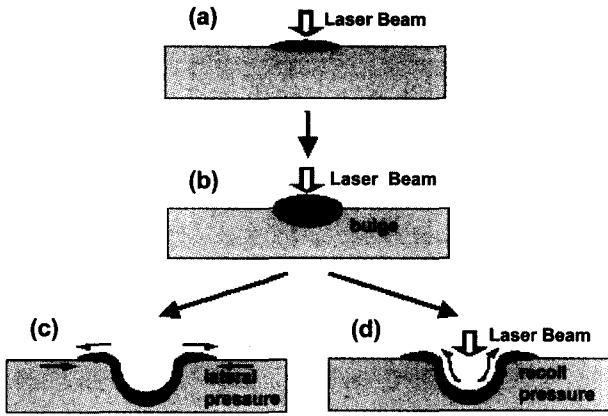


그림 2. 홈과 외륜 형성의 순서적인 개략도: (a) 국부적인 열팽창에 의해 형성된 증배, (b) 표면장력에 의해 유도되는 증배의 흐름, (c) 냉각수축에 의한 외륜 형성, (d) 되튐압력에 의한 외륜 형성.

다. 여기에서 단위는 nJ 이다.^[10-13]

III. 시편 제작 및 실험

3.1. 시편 제작

본 연구에서는 CD-R 다층막의 구성물질에 대한 광학적 특성을 연구하기 위해 각 층을 분리하여 별도로 제작하였다. 다만, 보호 층의 UV 락커 코팅공정을 제외한 나머지의 제조 공정에서 별도로 시편을 제작함으로써 기판 층, 기록 층, 반사 층의 성분 물질에 대해서만 실험하였다. 시편 제작 방법은 전형적인 CD/CD-ROM의 제조공정에 염료 코팅 과정을 부가하여 제작하였다. 폴리카보네이트(Polycarbonate)는 그르브(groove)와 랜드(land)의 형태를 유지하도록 사출 성형하였고, 시아닌(Cyanine solution 14 + Quencher 2.5) 또는 프탈로시아닌(Cu-Pthalocyanine)을 스펀-코팅한 후 진공 오븐에서 건조시켰고, 은(Ag)은 스퍼터(Sputter: BPS Swire12.5)를 이용하여 25초 동안 진공 증착시켰다. 그림 3은 제작된 각 시편의 다층구조를 나타낸 것이며, 그림 4는 각 시편의 표면을

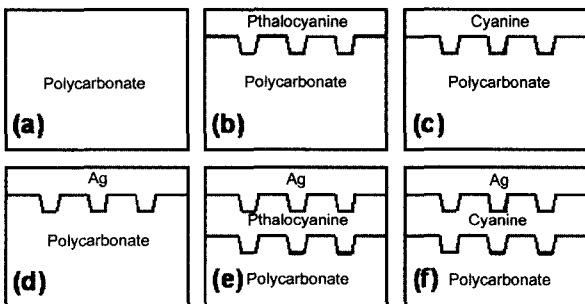


그림 3. 제작된 각 시편의 다층 구조: (a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine, (c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag, (e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag.

6000배의 배율로 촬영한 SEM(scanning electron microscopy) 사진이다. 그림 4는 그림 1과 3에서 보여준 그르브와 랜드의 차이를 한 눈에 관찰할 수 있으며, 각 샘플의 코팅 성분에 따른 균일성의 차이를 볼 수 있다.

3.2. 미소 점 마킹(spot marking)

본 연구에서는 그림 5에서와 같이 Q-스위치 펄스 변조 Nd:YAG 레이저 ($\lambda = 1.06 \mu\text{m}$, HY-2, Haanol Laser Co.-South Korea) 공진기에서 배출된 3 mm의 레이저 빔을 2.7배의 빔 확대기를 거치게 한 후, $\lambda/4$ 플레이트를 이용하여 선형 편광 빔을 원형 편광 빔으로 변화시켰다. 이 원형 편광된 빔은 광 분리기를 통해 두 경로로 나누어진다. 한쪽의 경로는 시편에 레이저 빔을 조사하는데 사용되며, 다른 한쪽은 조사된 레이저 빔의 에너지를 측정하는데 사용된다. 시편의 정확한 위치에 레이저 빔을 조사하기 위하여 x-y 위치 제어 시스템을 적용하였으며, 렌즈와 시편사이의 거리를 5~7 mm로 유지하고 좌우 수평 이동시키면서 빔을 조사하였다. 또한 조사된 레이저 빔의 에너지를 측정하기 위해 파워미터(laser power/energy meter, Nd:YAG F300A nova detector and display)를 이용하여 레이저 세기의 변화에 따라 조사된 레이저 빔의 에너지를 측정하였다. 그리고 미소 점($80 \mu\text{m}$) 마킹 후 시료의 반사 빔 신호는 다시 광 분리기를 거쳐 광 검출기(DET 210, high-speed silicon detector, Thorlabs Inc-USA)로 수광 후 디지털 오실로스코프(digital storage oscilloscope, Wave pro 950 4 channel 1 GHz, LeCroy-USA)를 이용하여 시간에 대한 진압의 변화로부터 반사 빔의 강도를 측정하였다. 또한, UV-spectrometer (Shimadzu, UV-3010PC)를 이용하여 측정된 반사율은 시그마 플롯(sigma plot 8.0 version)으로 산출하였다.

본 연구에 적용한 레이저 파라미터는 SS(Step Size)는 1~1500 μm , MD(Mark Delay)는 0~6000 μm , LC(Lamp Current)는 65~94%, F(Frequency)는 5~10 kHz, D (Duty)는 5~12%의 범위 내에서 실험하였다. 주로 F = 10 kHz일때 펄스 반복 시간(pulse repetition)이 100 μs 이고, D = 12%일때 펄스폭(pulse width)은 12 μs , 기계적인 조작을 제외시킨 실제 조사

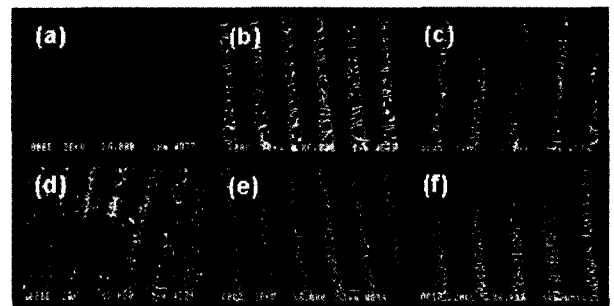


그림 4. 시편 표면의 SEM 사진 (6,000 배율): (a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine, (c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag, (e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag.

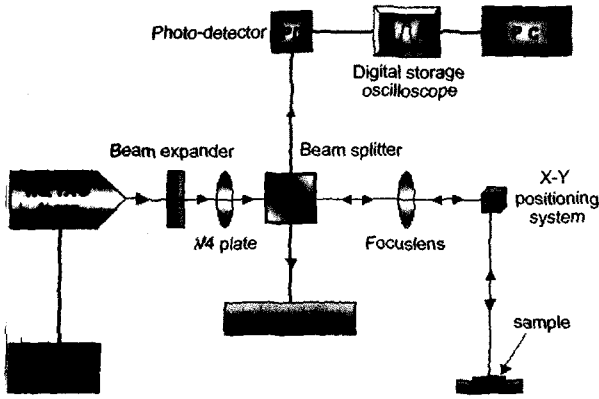


그림 5. 레이저 미소 점 마킹(Laser spot marking)을 위한 실험장치도.

시간은 200 ms으로 한번에 2000회의 펄스가 조사되므로 펄스당 에너지는 전체 에너지가 156 mJ일때 0.078 mJ이며, 전체 에너지가 168 mJ일때 0.084 mJ임을 알 수 있다.

3.3. 홈 형성(pit formation) 분석

다층 박막의 미소 점 마킹후의 변형된 형상들은 광학 현미경(OSM-1, Dongwon Co.-South Korea)과 광 결맞음 단층촬영기(OCT; Optical Coherence Tomography)를 이용하여 비교 분석 하였다. OCT는 단면 이미지를 볼 수 있는 새로운 형식의 광 영상 촬영기이다. 주로 의학 분야에서 매우 다양하게 사용되고 있는 OCT는 광 저장매체, 물질분석, 초미세 유체 역학 장치 등의 이공학적인 분야에서의 연구가 일부 보고 되었다.^[14-16]

OCT의 기본적인 시스템의 구성은 그림 6에서 보여주고 있다. OCT 시스템에서는 저 간섭(low coherence) 광원을 사용하며, 이러한 광원은 광 분리기를 통해 두 경로로 나누어진다. 한쪽의 경로는 샘플을 측정하는데 사용되며, 다른 한쪽은 샘플 쪽의 신호에 맞추어 간섭신호를 만드는데 사용되어진다. 이러한 두 경로의 신호는 반사되어 다시 광 분리기를 거쳐 광 검출기로 가게되며 검출된 신호는 신호처리를 거쳐 이미지로 만들어진다. 검출된 신호는 매우 미약하기에 일단 먼저 증폭을 시키고 필터링과 다모듈레이션 작업을 거친

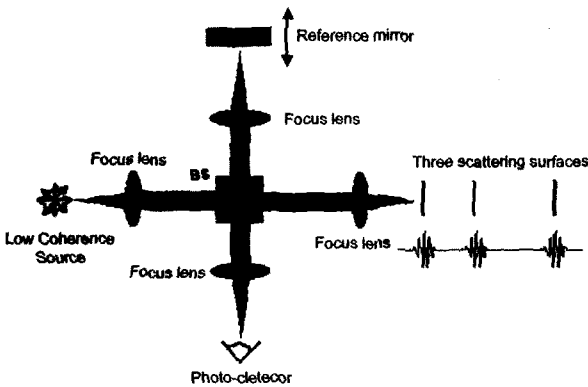


그림 6. OCT 시스템의 구성도.

다. OCT에서의 신호검출은 간섭계의 샘플 단이 측정하고자 하는 영역을 수평으로 이동하고 스캔하는 동안 계속되며, 각 위치에서의 신호들이 모여져 OCT 이미지를 형성하게 된다.^[17,18] 본 연구에서 사용한 OCT 시스템의 광원은 중심 파장이 1310 nm이고 주파수 대역폭(bandwidth)이 70 nm인 출력 10 mW의 광대역 극-발광 다이오드(broadband superluminescent diode)를 적용하였다. 또한 샘플의 정확한 이미지 스캔 위치를 찾기 위해서 가시영역($\lambda = 633 \text{ nm}$)의 레이저 빔을 활용하였다.

IV. 결과 및 논의

레이저빔과 물질과의 상호작용 연구에 선행되어야 할 과정은 레이저 파라미터(F, D, LC, SS, MD)에 따라 광 디스크에 적합한 최적 마킹 조건을 찾는 것이다. F(frequency)와 D(duty)는 상호 보완적인 관계에 있기 때문에 정밀한 마킹 형상이 되도록 동시에 바꾸어 가면서 조절해야 되는데 F의 범위는 5~10 kHz, D의 범위는 5~12%까지 변화시켰다. 또한 LC (lamp current)의 변화 범위 내에서 최적의 마킹이 되는 SS (step size)와 MD (mark delay)의 파라미터는 F = 10 kHz와 D = 12%일때 최적 조건임을 알 수 있었다. 따라서 시편에 코팅된 다층 박막의 두께를 투과하지 않는 범위 내에서 마킹할 수 있는 파라미터의 조건은 F = 10 kHz, D = 12%, SS = 5, 1500 μm , MD = 1, 3, 1000 μs 로 나타났다. SS = 1500 μm , MD = 1 μs 일때 폴리카보네이트 층은 전혀 마킹이 되지 않았지만 시아닌 층은 LC = 75~94%, 프탈로시아닌 층은 LC = 90~94%, 시아닌+은 층은 LC = 65~94%, 프탈로시아닌+은 층은 LC = 75~94%에서 마킹되었다. 그러나 은 층은 SS = 1500 μm , MD = 3 μs , LC = 85~94%에서만 마킹되었다. 또한, 시아닌+은 층, 프탈로시아닌+은 층, 은 층은 LC = 90~94%에서 레이저빔의 투과흔적이 미소하게 관찰되었는데 이러한 불규칙적인 결과를 가지고는 일관된 마킹 형상을 분석할 수 없었다. 따라서 보다 일관된 마킹 형상과 홈 형성 메커니즘을 분석하기 위해서는 동일한 조건에서 마킹을 해야 한다. 이러한 반복된 마킹 실험의 결과로부터 모든 시편에 적합한 조건을 SS = 5 μm , MD = 1000 μs , F = 10 kHz, D = 12%로 찾아냈다. 이때의 에너지는 그림 7과 같으며, 92~373 mJ까지 지수 함수적으로 계속 증가하다가 347 mJ에서 차츰 감소되면서 일정해짐을 볼 수 있다.

시편에 레이저 빔을 조사할때 반사에 의해 손실되는 에너지는 그림 8과 같이 조사 에너지에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 동시에 박막의 반사율이 클수록 손실된 에너지가 크다는 것을 알 수 있다. 미소 점 마킹때 시편의 표면에 미치는 에너지는 조사 에너지에 비례하여 대체로 0.018~0.0742 mJ/ μm^2 로 증가하였다. 레이저 빔을 156 mJ로 조사할때 시아닌+은 층은 133.56 mJ, 프탈로시아닌+은 층은 120.20 mJ, 은 층은 59.78 mJ, 시아닌과 프탈로시아닌 등의 단일 층은 폴리카보네이트와 비슷하게 약 12 mJ로 반사에 의해 에

너지가 손실되었다. 따라서 은 층과 시아닌+은 층, 프탈로시아닌+은 층은 다른 층들보다 반사에 의한 에너지 손실이 크기 때문에 주의 깊게 마킹해야 한다.

그림 9는 SS = 5 μm, MD = 1000 μs의 조건하에서 LC를 70~94%(156~373 mJ)로 변화시켜가면서 레이저 빔을 시편의 박막에 조사하여 생긴 마킹 형상을 80배율의 광학 현미경으로 찍은 것이다.

그림 9(a)의 폴리카보네이트 층은 156~168 mJ에서 마킹은 되지 않았지만 미소하게 스크래칭 되었고 균일한 표면상태를 유지하였으며, 226 mJ에서 희미한 마킹 형상이 나타나기 시작하였다. 245 mJ에서는 뚜렷한 마킹 형상과 용융 흔적이 관찰되었고 347 mJ와 373 mJ으로 마킹할때 제거된 미소질량은 미소 점 주위에 검게 그을린 번 패턴(burn pattern)과 용융 비산물 및 증발 흔적 등이 나타났다. 또한, 내열성과 내광성이 크기 때문에 다른 층들보다 높은 에너지에서 최적 마킹 형상을 얻을 수 있었다.

그림 9(b)의 프탈로시아닌 층은 156 mJ부터 마킹되었고, 245 mJ부터는 마킹 점 주위에 용융과 증발 흔적이 관찰되었으며, 347 mJ와 373 mJ에서는 균열이 심하고 용융과 증발 흔적이 커져 일정한 마킹 패턴을 볼 수 없었다.

그림 9 (c)의 시아닌 층은 226 mJ이상에서 심한 왜곡으로 일정한 패턴을 관찰하기 어려웠고, 373 mJ부터 미소 점 주위에 증발 흔적이 보이기 시작하였으며, 347 mJ일때 용융점 위에 기화되지 못한 미소한 입자가 발견되었다. 특히 그림 9 (b)의 프탈로시아닌 층과 그림 9(c)의 시아닌 층에서는 347 mJ와 373 mJ로 빔을 조사했을 때 박막의 갑작스런 온도상승에 의하여 흙의 함물과 흙 주위에 번 패턴이 형성되어 정밀한 형상을 얻을 수 없었으며, 용융점 위에 증발 잔여물들이 관찰되었다. 만약 증발 잔여물들을 그대로 방치한다면 미세한 형상을 얻을 수 없기 때문에 표면에 잔여물이 없도록 방지하는 조치가 필요하다.

그림 9(d)의 은 층은 156~168 mJ에서 희미한 마킹 흔적이 관찰되었고, 226 mJ일때 보다 진한 마킹 형상을 관찰할 수 있었다. 또한, 245 mJ일때는 마킹 점 중심에 뭉쳐진 용융 흔적이 발생하였고, 마킹 점 주변에서 용융 비산물과 증발 흔적이 관찰되었다. 347 mJ일때는 373 mJ 보다 마킹 형상은 비슷하였지만 번 패턴과 용융 비산물, 증발 흔적이 보다 많이 관찰되었다.

그림 9(e)의 프탈로시아닌+은 층과 (f)의 시아닌+은 층은 156 mJ일때부터 마킹 형상이 관찰되었고, 168 mJ일때 적절한 형상으로 마킹이 가능하였다. 그리고 226 mJ 이상에서는 염료인 프탈로시아닌과 시아닌이 레이저 조사때 발생한 열 전달로 녹아 없어지고 바로 다음의 은 층을 거의 녹이지 못하여 은 층 표면 위에 용융 비산물들이 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다.

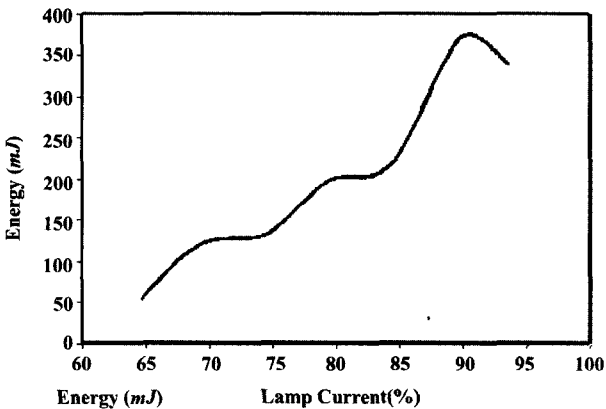


그림 7. 레이저 마킹 조건 (SS = 5 μm, MD = 1000 μs, F = 10 kHz, D = 12%)에서 램프 전류의 증가에 의한 빔의 세기 변화.

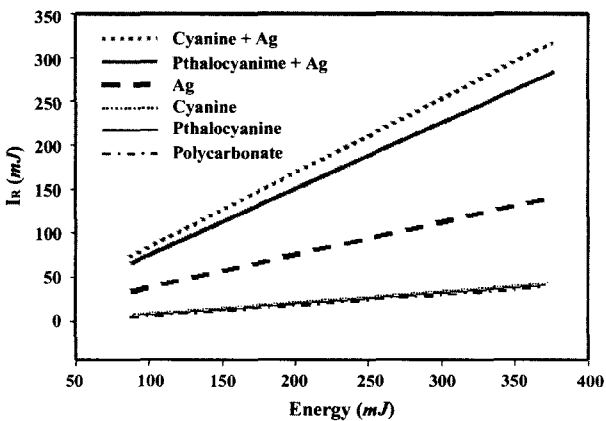


그림 8. 시편 표면에서의 반사에 의해 손실되는 빔 에너지.

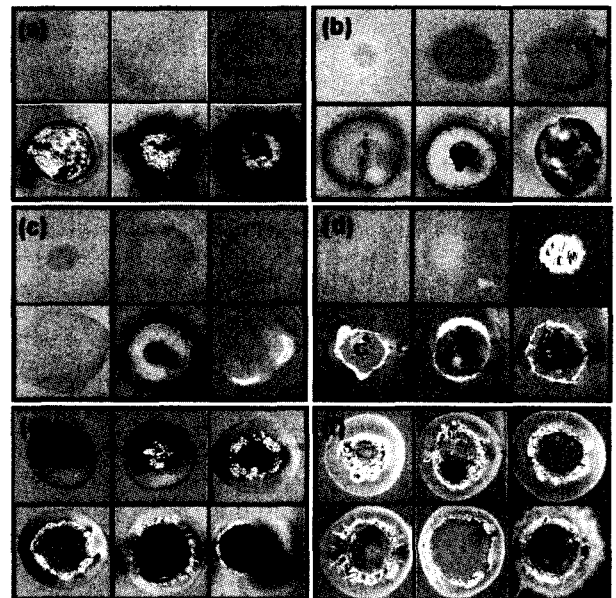


그림 9. 빔 에너지 변화에 따른 미소 점 마킹의 광학 현미경 사진 (300x300μm, SS=5μm, MD=1,000μs, Energy=156, 168, 226, 245, 373, 347mJ) : (a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine, (c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag, (e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag.

특히 373 mJ에서 (f)의 중심부가 선명하게 나타났으나, (e)의 중심부에서는 검게 그을린 흔적이 발견되었다. 이것은 시아닌 층은 용융되어 증발하여버리고 은 층은 거의 완벽하게 남아있으나, 프탈로시아닌은 용융된 후 용융 비산물, 증발 흔적 등이 아래의 은 층 위에 그대로 많이 남아있어서 선명한 마킹 형상을 얻을 수 없었다. 즉, 기록 층을 이루고 있는 염료(dye) 중 시아닌이 프탈로시아닌 보다 용융 후 증발이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 각 시료의 표면에 SS = 5 μm, MD = 1000 μs, LC = 90%(373 mJ)의 조건으로 레이저 빔 (spot size 80μm)을 조사하여 시편에 형성된 흠 형상을 OCT로 스캔한 것으로, 광학 현미경으로 찍은 그림 9와 비교하여 분석 하였다.

그림 10 (a)는 기관 층 (polycarbonate)만 있는 샘플에 미소 점 마킹을 했을 때, 폴리카보네이트가 완전히 용융되어 거의 반사가 없게 되므로 OCT 형상에서 위·아래 백색 선 사이의 검은 이미지가 선명하게 나타났다. 또한 다른 샘플의 OCT 형상과 비교 했을 때 아랫부분의 백색 선이 얇게 형성되었다. 이것은 기록 층 (dye)이나 반사 층 (Ag)이 증착된 다른 샘플들과 비교하여 반사계수(RC; Reflection Coefficient)가 훨씬 작기 때문이다.

그림 10 (b)와 (c)에서는 기관 층 (polycarbonate) 위에 기록 층 (dye)이 증착된 샘플에 미소 점 마킹을 했을 때, 폴리 카보네이트와 염료가 거의 동시에 용융되어 분리되었음을 보여주고 있다. (b)와 (c)의 OCT 형상의 윗부분에 보인 짧은 백색 선은 미소 점 조사 에너지에 의해 용융된 염료의 화학적 변화와 열적 변형 때문에 미소 점 중심에서 관찰된 것을 나타내고, 아랫부분의 불균일한 틈(gap)의 형상은 폴리카보네이트가 녹으면서 주위의 열 영향 층에 의한 성분의 변화로 나타났다. 또한, 기록 층 중에서 염료를 프탈로시아닌을 사용했을 때 보다 시아닌을 사용했을 때 아래 백색 선이 두껍게 나타남으로써 RC가 더 크다는 것을 알 수 있다.

그림 10 (d)는 기관 층 (polycarbonate) 위에 반사 층 (Ag)이 증착된 샘플에 미소 점 마킹을 했을 때, 은(Ag)은 거의 녹지 않고 폴리카보네이트만 용융되어 분리되었음을 보여주고 있다. OCT 형상의 윗부분에 보인 짧은 백색 선은 은(Ag)의 녹는점이 높아서 완전히 녹지 않고 용융 흔적이 중심부에 뭉쳐져서 나타난 것이다. 이는 은의 반사 빔 강도의 영향으로 심하게 왜곡된 그림 8의 OM 미소 점 형상과 잘 일치하고 있다. 또한 아랫부분의 백색 선에서 불균일한 틈의 발생은 조사된 레이저 빔에 의한 폴리카보네이트의 열 영향 층에 의한 성분의 변화 때문에 RC가 감소함을 의미하며, 두꺼운 백색 선의 발생은 은(Ag)의 RC가 염료(dye) 및 폴리카보네이트(polycarbonate) 보다 훨씬 높기 때문이다.

그림 10 (e)와 (f)는 기록 층(dye)이 반사 층(Ag) 위에 증착된 샘플에 미소 점 마킹을 했을 때를 나타낸 것이다. (e)와 (f)의 OCT 형상의 아랫부분의 백색 선은 염료가 코팅 되어 있기 때문에 은이 코팅된 (d)보다 얇고 정밀한 선이 형성되었다. (e)의 윗 중심부의 일부 백색 선으로 막혀진 것은 레이

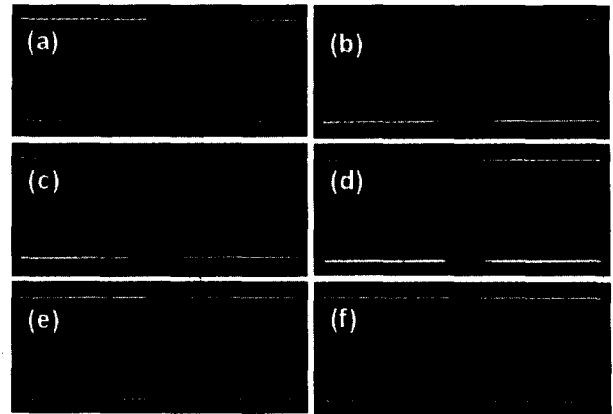


그림 10. 373 mJ의 레이저 빔을 조사한 시편의 OCT 이미지 (3.0 x 1.5 mm with 10 μm/pixel): (a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine, (c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag, (e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag.

저 조사 시 발생한 열전달로 염료 층을 녹이고 바로 아래의 은 층을 거의 용융시키지 못하여 은 표면 위에 용융 비산물들이 그대로 남아 있기 때문이다. (f)의 윗부분은 (e)보다 완전히 막혀진 백색 선을 볼수 있는데 염료층만을 녹여서 없애 버리고 은 층은 거의 완벽하게 남아있기 때문이다. 이러한 백색 선의 선명도 차이는 시아닌이 프탈로시아닌보다 레이저 빔에 의한 화학적 변화가 더 우세하여 분해가 더 잘된다는 것을 보여주고 있다.

V. 결 론

Nd:YAG 레이저 빔과 광 저장매체 중의 하나인 콤팩트디스크(CD-R; Compact Disk-Recordable)를 성분별로 분리하여 제작한 다층 박막과의 상호작용에 관한 연구는 각 시료의 표면에 27~373 mJ의 레이저 빔을 80 μm의 점적 크기로 조사하여 샘플에 형성된 흠 형태를 광학 현미경(OM; Optical Microscope)에 의한 미소 점 형상과 광 결맞음 단층촬영기(OCT; Optical Coherence Tomography) 이미지, 시 분할 반사 빔의 강도변화 및 반사율을 측정하였다. 이러한 결과와 분석으로부터 흠과 외륜의 형성 메커니즘을 알 수 있었다.

OCT 형상을 OM 형상과 비교하여 분석하면, 기관 층 (Polycarbonate)과 기록 층(Dye)에서는 완전히 용융되어 짧은 시간동안 충분한 열 흐름으로 열팽창 되어 증배의 형성이 시작되면서 체적을 증가시켰다. 즉, OM에서 보여주는 미소 점으로 마킹된 부분의 경계와 OCT에서 보여주는 이미지의 확산으로부터 열 영향 층을 읽을 수 있었다.

기록 층(Dye)과 반사 층(Ag)의 경계면에서는 염료를 용융시켜 흠이 형성되었지만, 은(Ag)은 높은 용융점 때문에 그대로 남아 있음을 알 수 있다. 즉, OCT 윗부분의 짧은 백색 선은 용융으로 인해 형성된 증배를 말하며 이러한 용융은 밖으로 흘러나온다. 아래 중심부의 검은 이미지는 증배가 식고

표면장력의 유도된 힘의 작용하에 생성되는 흠의 형성을 의미한다. 그리고 계속해서 일어나는 냉각과 수축은 외륜에 의해 주위의 합몰이 생기게 되는데, 이때 염료와 은 층의 경계면에서는 OCT 형상으로부터 흠 주위의 합몰과 외륜의 흔적을 알 수 있었다. 따라서 외륜의 형성은 흠이 형성되는 동안 용융된 물질의 움직임이 있었음을 알 수 있다.

이와 같이 Nd:YAG 레이저에 의한 미소 점 가공 형상은 OM과 OCT 측정을 통해서 가시적으로 다층 박막의 흠 형성 메커니즘을 설명할 수 있다. 따라서 광·화학적 작용에 의해 미소 점 마킹의 주위에서 가열과 냉각에 따른 재료의 변형, 증발 입자, 불균일한 표면 형상과 같은 열적 현상들을 완전히 제거 하는 것이 다층 박막의 가공에서는 매우 중요하다. 그러므로 보다 파장이 짧은 레이저 빔을 조사하거나 펄스 폭을 줄여서 조사한다면 빔 에너지가 열에너지로 바뀌는 대신 화학적 분해에 이용되므로 미소 점 마킹의 주위나 가장자리 및 표면이 깨끗하고 열 영향 층이 거의 없는 정밀한 미소 점 마킹을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구를 수행하는데 OCT를 유용하게 사용하도록 허락하여준 Beckman Laser Institute, Univ. of California at Irvine의 Zhongping Chen 교수와 W. Jung 연구원에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] K. Kim and B. Lee, "Recording of optical near-field holography", *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 22, pp. 1800-1802, 2001.
- [2] J. Wilson and J. F. B. Hawkes, *Laser principles and applications*, (Prentice Hall International Ltd., UK, 1987), pp. 106-118, pp. 204-233.
- [3] S. H. Slivinsky and N. E. Ogle, "Laser beam interaction with plastic" *J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 9, pp. 3660-3664, 1977.
- [4] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C.A. Puliavito, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science*, vol. 254, pp. 1178-1181, 1991.
- [5] J. M. Schmitt, "Optical coherence tomography (OCT): A review," *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, vol. 7, pp. 931-935, 2001.
- [6] K. F. Wissbrun, "Thermal expansion and flow model for pit formation in laser marking of polymeric film optical disks", *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, no. 3, pp. 1123-1124, 1998.
- [7] J. J. Wrobel, A. B. Marchant, and D. G. Howe, "Laser marking of thin organic films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, no. 11, pp. 928-930, 1982.
- [8] J. C. Conde, F. Lusquions, P. Gonzalez, B. Leon and M. P. Amor, "Temperature distribution in laser marking." *J. Laser. Appl.*, vol. 13, pp. 105-107, 2001.
- [9] D. A. Hill and D. S. Soong, "A model for laser marking of thin organic data storage layers by short intense pulse", *J. Appl. Phys.*, vol. 61, pp. 2132-2135, 1987.
- [10] K. Y. Law and G. E. Johnson, "Ablative optical recording using organic dye-in-polymer thin films," *J. Appl. Phys.*, vol. 54, no. 9, pp. 4799-4805, 1983.
- [11] T. S. Chung, "Pit formation during laser marking of thin organic films," *J. Appl. Phys.*, vol. 60, no. 1, pp. 55-60, 1986.
- [12] U. S. Sathyam, A. Shearin, and S. A. Prahl, "Investigation of basic ablation phenomena during laser thrombolysis," *Diagnostic and Therapeutic Cardiovascular Interventions VII*. R. R. Anderson et al. Ed., *Proc. SPIE*, vol. 2970, pp. 19-27, 1997.
- [13] E. G. Gamarly, A. V. Rode, and B. Luther-Davies, "Ultrafast ablation with high-pulse-rate lasers. Part I: Theoretical Considerations," *J. Appl. Phys.*, vol. 85, no. 8, pp. 4213-4221, 1999.
- [14] S. R. Chinn and F. A. Swanson, "Multilayer optical storage by low-coherence reflectometry," *Optics Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 899-901, 1996.
- [15] J. T. Oh and S. W. Kim, "Polarization-sensitive optical coherence tomography for photoelasticity testing of glass/epoxy composites," *Optics Express*, vol. 11, no. 14, pp. 1669-1676, 2003.
- [16] Z. Chen, T. E. Miller, D. Dave, and J. S. Nelson, "Optical Doppler tomographic imaging of fluid flow velocity in highly scattering media", *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 1, pp. 64-66, 1997.
- [17] G. J. Tearney, B. E. Bouma, and F. G. Fujimoto, "High-speed phase- and group-delay scanning with a grating-based phase control delay line," *Opt. Lett.*, vol. 22, pp. 1811-1813, 1997.
- [18] A. M. Rollins, M. D. Kulkarnis, S. Yazdanfar, R. Ungarunyawee, and J. A. Izatt, "In vivo video rate optical coherence tomography," *Opt. Express*, vol. 3, pp. 219-229, 1998.

Spot marking of the multilayer thin films by Nd:YAG laser

Hyunjin Kim

Department of Optical Engineering, Chosun University, Gwangju, 501-759, South Korea

Yongjin Shin[†]

*Department of Physics, Chosun University, Gwangju, 501-759, South Korea, and Beckman Laser Institute,
University of California at Irvine, Irvine, CA, 92612, USA*

[†]E-mail: yshin@chosun.ac.kr

(Received September January 19, 2004, Revised manuscript June 8, 2004)

We separated the multilayer structure of CD-R(compact disk-recordable) and investigated optimal spot marking conditions and physical and chemical transitions in response to various laser beam energy levels. Spot marking(80 μm spot size) was produced on the surface of each layer using a Q-switched Nd:YAG laser between 27 mJ and 373mJ. By investigating resulting pit formation with Optical Microscopy(OM) and Optical Coherence Tomography(OCT), we analyzed the formation process of spot marking in the multilayer structure of different chemical composition. The localized heating of the substrate in the multilayer thin film caused the short temporal thermal expansion, and absorbed optical energy between reflective and dye interfaces melted dye and increased the volume. During the cooling phase, formation of pit and surrounding rim can be explained by three distinct processes; effect of surface tension, evaporation by spontaneous temperature increase due to laser energy, and mass flow from the recoil pressure. Our results shows that the spot marking formation process in the multilayer thin film is closely related to the layers' physical, chemical, and optical properties, such as surface tension, melt viscosity, layer thickness, and chemical composition.

OCIS Codes : 210.4810, 240.0310, 350.3390.