

# OCT에 의한 다층 박막의 Spot Marking 분석

신용진 · 김현진 · 김영섭 · 박소희

조선대학교 자연과학대학 물리학과

## Investigation of Spot Marking in Multilayer Thin Films using OCT

Yongjin Shin, Hyunjin Kim, Youngseop Kim and Sohee Park  
Department of Physics, College of Natural Science, Chosun University

### Abstract

We propose a novel application of optical coherence tomography (OCT) to monitor pit formation in laser irradiated optical storage materials. A multilayer optical storage recordable compact disk, is composed of multiple layers, each of different structure. Disks were irradiated with aQ-Switched Nd:YAG laser with an energy of 373 mJ. Post-irradiated disks were evaluated by OCT and those images were compared with optical microscopy. Our results indicate that OCT is a useful instrument to investigate pit formation in multilayer optical storage disks and might also provide information to optimize optical memory technology.

**Key Words** : Spot marking, Multilayer thin film, Optical coherence tomography, Nd:YAG laser

## 1. 서 론

광 기록매체의 기록메커니즘에 대한 연구가 활발해지기 시작하면서 다양한 변형 효과에 의한 기록 방법들이 제안되었다.<sup>1,2)</sup>

더 나아가 궁극적인 물질의 특성들에 대한 현상들을 이해하기 위해서 레이저 빔과 물질의 상호작용에 대한 구체적인 연구가 이

루어지고 있다.<sup>3,4)</sup> 그러나 이러한 변형 효과 및 상호작용은 간접적인 수치 해석적 방법 등에 의해 단지 변형들이 예측되었을 뿐, 변형된 형상들을 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 만들어서 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 $\mu\text{m}$ ) 마킹은 Q-스위치 펄스 변조 Nd:YAG (Multi-mode 80W, TEM<sub>00</sub> 모드 20W)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)<sup>5-8)</sup>로 비교·분석하였다. 따라서 미소 점 마킹의 형성과정을 분석함으로써 홀로그래프, 반도체 회로기판 등 다양한 레이저를 이용한 초정밀 가공의 가능성을 고찰할 수 있다. 또한 플라스틱 광 저장매체에서 데이터 형성에 관한 연구의 기초자료로 이용할 수 있다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 CD-R 다층막의 구성물질에 대한 광학적 특성을 연구하기 위해

각 층을 분리하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 다만, 보호 층의 UV 락커 코팅공정을 제외한 나머지의 제조공정에서 별도로 시편을 제작함으로써 기관 층, 기록 층, 반사 층의 성분 물질에 대해서만 실험하였다. 시편 제작 방법은 전형적인 CD/CD-ROM의 제조공정에 염료 코팅 과정을 추가하여 제작하였다. 폴리카보네이트(Polycarbonate)는 그루브(groove)와 랜드(land)의 형태를 유지하도록 사출 성형하였고, 시아닌(Cyanine solution 14 + Quencher 2.5) 또는 프탈로시아닌(Cu-Pthalocyanine)을 스핀-코팅한 후 진공 오븐에서 건조시켰고, 은(Ag)은 스퍼터(Sputter: BPS Swire12.5)를 이용하여 25초 동안 진공 증착시켰다.

Spot marking은 Fig. 2에서와 같이 Q-스위치 펄스 변조 Nd:YAG 레이저 ( $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , HY-2, Haanol Laser Co.-South Korea) 공진기에서 배출된 3mm의 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 분리를 통해 두 경로로 나누어진다. 한쪽의 경로는 시편에 레이저 빔을 조사하는데 사용되며, 다른 한쪽은 조사된 레이저 빔의 에너지를 측정하는데 사용되어진다. 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 분리를 거쳐 광 검출기(DET 210, high-speed silicon detector, Thorlabs Inc-USA)로 수광 후 디지털 오

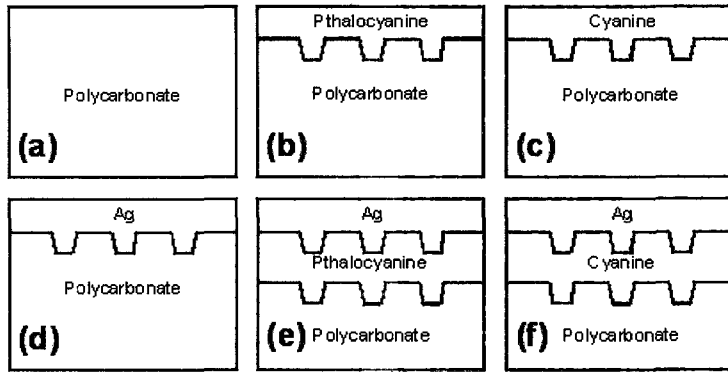


Fig. 1. 제작된 각 시편의 다층 구조:

- (a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine,
- (c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag,
- (e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag

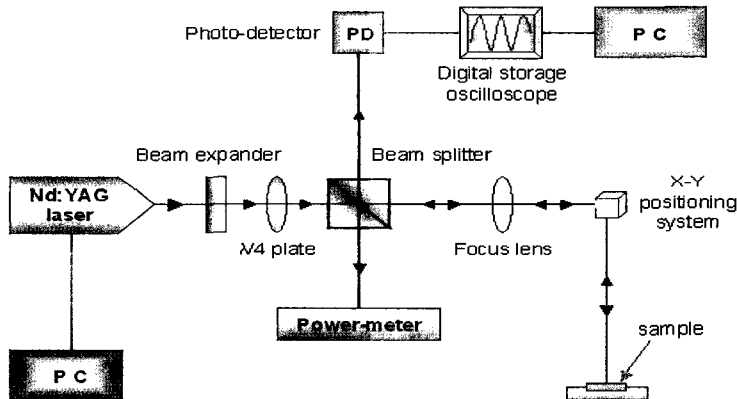


Fig. 2. 레이저 미소 점 마킹(Laser spot marking)을 위한 실험장치도.

실로스코프(digital storage oscilloscope, Wave pro 950 4 channel 1GHz, LeCroy-USA)를 이용하여 시간에 대한 전압의 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 1~1,500  $\mu\text{m}$ , MD(Mark Delay)는 0~6,000  $\mu\text{m}$ , LC(Lamp Current)는 65~94 %, F(Frequency)는 5~10 kHz, Duty(D)는 5~12%의 범위 내에서 실험하였다.

### 3. 결과 및 고찰

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 = 10kHz와 D = 12%일때

최적 조건임을 알 수 있었다. 따라서 시편에 코팅된 다층 박막의 두께를 투과하지 않는 범위 내에서 마킹할 수 있는 파라미터의 조건은  $F = 10\text{kHz}$ ,  $D = 12\%$ ,  $SS = 5$ ,  $1,500\mu\text{m}$ ,  $MD = 1, 3, 1,000\mu\text{s}$ 로 나타났다.

Fig. 3은  $SS = 5\mu\text{m}$ ,  $MD = 1,000\mu\text{s}$ 의 조건하에서 LC를 70~94% (156~373 mJ)로 변화시켜가면서 레이저 빔을 시편의 박막에 조사하여 생긴 마킹 형상을 80배율의 광학 현미경으로 찍은 것이다. 여기에서 레이저 시스템의 LC를 65~94%로 증가시켰을 때 실제로 90% 이상에서는 빔 에너지가 347 mJ로 감소하였으나 본 실험에서는 LC의 증가 순서대로 OM 이미지를 촬영하였다.

Fig. 3(a)의 폴리카보네이트 층은 156~168mJ에서 마킹은 되지 않았지만 미소하게 스크래칭 되었고 균일한 표면상태를 유지하였으며, 226mJ에서 희미한 마킹 형상이 나타나기 시작하였다. 245mJ에서는 뚜렷한 마킹 형상과 용융 흔적이 관찰되었고 347mJ과 373mJ으로 마킹할 때 제거된 미소질량은 미소 점 주위에 검게 그을린 번패턴(burn pattern)과 용융 비산물 및 증발 흔적 등이 나타났다. 또한, 내열성과 내광성이 크기 때문에 다른 층들보다 높은 에너지에서 OM으로 박막의 변화를 인지할 수 있는 레이저 빔의 최소 에너지 값인 최적 마킹 형상을 얻을 수 있었다. Fig. 3(b)의 프탈로시아닌 층은 156mJ부터 마킹되었고, 245mJ부터는 마킹 점 주위에 용융과 증발 흔적이 관찰되었으며, 347mJ과 373mJ에서는 균열이 심하고 용융과 증발 흔적이 커져 일정한 마킹 패턴을 볼 수 없었다. Fig. 3(c)의 시아닌 층은 245mJ이상에서 심한 왜곡으로 일정한 패턴을 관찰하기 어려웠고, 373mJ부터 미소 점 주위에 증발 흔적이 보이기 시작하였으며, 347mJ일때 용융점 위에 기화되지 못한 미소한 입자가 발견되었다. 특히 Fig. 3(b)의 프탈

로시아닌 층과 Fig. 3(c)의 시아닌 층에서는 347mJ과 373mJ로 빔을 조사했을 때 박막의 갑작스런 온도상승에 의하여 흠의 합물과 흠 주위에 번패턴이 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 shielding gas를 주입하거나, 보다 파장이 짧은 레이저 빔을 조사하는 조치가 필요하다. Fig. 3(d)의 은 층은 156~168mJ에서 희미한 마킹 흔적이 관찰되었고, 226mJ일때 보다 진한 마킹 형상을 관찰할 수 있었다. 또한, 245mJ일때는 마킹 점 중심에 뭉쳐진 용융 흔적이 발생하였고, 마킹 점 주변에서 용융 비산물과 증발 흔적이 관찰되었다. 347mJ일때는 373mJ 보다 마킹 형상은 비슷하였지만 번패턴과 용융 비산물, 증발 흔적이 보다 많이 관찰되었다. Fig. 3(e)의 프탈로시아닌+은 층과 (f)의 시아닌+은 층은 156mJ일때부터 마킹 형상이 관찰되었고, 168mJ일때 적절한 형상으로 마킹이 가능하였다. 그리고 226mJ 이상에서는 염료인 프탈로시아닌과 시아닌이 레이저 조사때 발생한 열전달로 녹아 없어지고 바로 다음의 은 층을 거의 녹이지 못하여 은 층 표면 위에 용융 비산물들이 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 특히 373mJ를 조사하였을 때 Fig. 3(f)의 중심부가 선명하게 나타났다. Fig. 3(e)의 중심부에서는 검게 그을린 흔적이 발견되었다. 이것은 시아닌 층은 용융되어 증발하여 버리고 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 프탈로시아닌보다 용융 후 증발이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

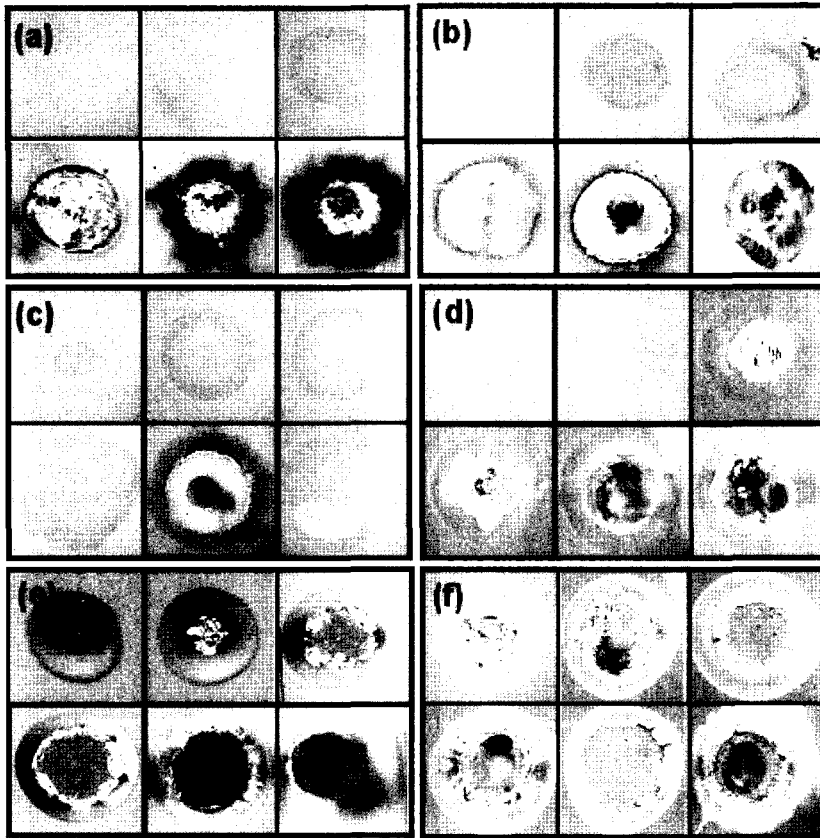
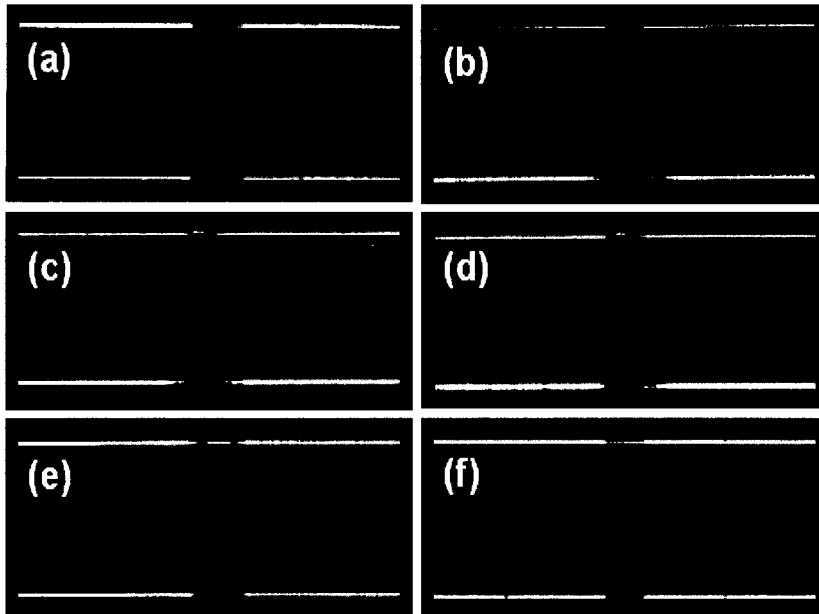


Fig. 3. 빔 에너지 변화에 따른 미소 점 마킹의 광학 현미경 사진  
 (80배율, SS=5 $\mu$ m, MD=1,000 $\mu$ s, Energy=156, 168, 226, 245, 373, 347mJ) :  
 (a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine,  
 (c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag,  
 (e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag

Fig. 4는 각 시료의 표면에 SS = 5  $\mu$ m, MD = 1,000  $\mu$ s, LC = 90 % (373 mJ)의 조건으로 레이저 빔 (spot size 80 $\mu$ m)을 조사하여 시편에 형성된 홈 형상을 OCT로 스캔한 것으로, 광학 현미경으로 찍은 Fig. 3과 비교하여 분석 하였다. Fig. 4(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. 여기에서 위 백색 선은 샘플의 윗부분인 투명한 PMMA에서, 아래 백색 선은 샘플의 아랫부분인 얇게 박막이 코팅된 곳에서 반사된

부분인 얇게 박막이 코팅된 곳에서 반사된 빔을 나타내며, 두께가 같은 PMMAdml 아랫부분에 100~300 nm의 두께로 다층박막을 이루었기 때문에 거의 같은 이미지 간격을 나타내고 있다. 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. Fig. 4(b)와 (c)에서는 기관 층 (polycarbonate) 위에 기록 층 (dye)이 증착된 샘플에 미소 점 마킹을 했을 때, 폴리카보네이트와 염료가 거의 동시에 용융되어 분리되었음을 보



**Fig. 4.** 373 mJ의 레이저 빔을 조사한 시편의 OCT 이미지

(3.0x1.5mm with 10  $\mu$ m/pixel) :

(a) Polycarbonate, (b) Polycarbonate + Pthalocyanine,

(c) Polycarbonate + Cyanine, (d) Polycarbonate + Ag,

(e) Polycarbonate + Pthalocyanine + Ag, (f) Polycarbonate + Cyanine + Ag.

여주고 있다. Fig. 4(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. Fig. 4(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 묻혀져서 나타난 것이다. 이는 은의 반사 빔 강도의 영향

으로 심하게 왜곡된 Fig. 3(d)의 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. Fig. 4(e)와 (f)는 기록 층(dye)이 반사 층(Ag) 위에 증착된 샘플에 미소 점 마킹을 했을 때를 나타낸 것이다. Fig. 4(e)와 (f)의 OCT 형상의 아랫부분의 백색 선은 염료가 코팅 되어있기 때문에 은이 코팅된 Fig. 4(d)보다 얇고 정밀한 선이 형성되었다. Fig. 4(e)의 윗 중심부의 일부 백색 선으로 막혀진 것은 레이저 조사 시 발생한 열전달로 염료 층을 녹이고 바로 아래의 은 층을 거의 용융시키지 못하여 은 표면 위에 용융 비산물들이 그대로 남아 있기 때문이다. Fig. 4(f)의 윗부분은

Fig. 4(e)보다 완전히 막혀진 백색 선을 볼 수 있는데 염료층만을 녹여서 없애버리고 은 층은 거의 완벽하게 남아있기 때문이다. 이러한 백색 선의 선명도 차이는 시아닌이 프탈로시아닌 보다 레이저 빔에 의한 화학적 변화가 더 우수하여 분해가 더 잘된다는 것을 보여주고 있다.

#### 4. 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 $\mu$ m의 spot 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, 기판 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 증배(bulge)를 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 가지적으로 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 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.

#### 참고문헌

1. J. Wilson and J. F. B. Hawkes, "Laser principles and applications", (Prentice Hall International Ltd., UK), pp.106-118, pp.204-233, 1987.
2. K. Kim and B. Lee, "Recording of optical near-field holography", Opt. Lett., Vol.26, No.22, pp.1800-1802, 2001.
3. 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.
4. S. H. Slivinsky and N. E. Ogle, "Laser beam interaction with plastic", J. Appl.

- Phys., Vo.48, No.9, pp.3660-3664, 1977.
5. 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. Puliafito, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography", Science, Vol.254, pp.1178-1181, 1991.
  - 6.. S. R. Chinn and F. A. Swanson, "Multilayer optical storage by low-coherence reflectometry", Optics Lett., Vol.21, No.12, pp.899-901, 1996.
  7. 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.
  8. 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.