

추기형 광디스크에서 최적 기록마크 생성을 위한 열전달 해석

홍성국* · 이정두* · 조형희† · 신정목** · 고성로** · 이경호**

Heat transfer analysis for optimization of recording mark on Compact Disk-Recordable

S. K. Hong, J. D. Lee, H. H. Cho, J. M. Shin, S. R. Go and K. H. Lee

Key Words: Compact Disk-Recordable(추기형 광디스크), Recording Mark(기록마크), Optimum Laser Power(최적의 레이저 파워), Heat Transfer(열전달)

Abstract

The present study conducted heat transfer analysis in multi-layer of CD-R. It is necessary to analyze heat transfer during the recording process to find optimum power and write strategy in CD-R. This study investigated effects of several parameters such as recording speed, laser power, layer thickness and thermal property. The calculated results presented temperature distribution in the multi-layer and detailed information of recording characteristics. Optimum laser power was estimated, comparing an optimum mark length with the calculated mark lengths. The results showed that the optimum laser power was influenced significantly by the layer thickness and the thermal properties of the dye.

기호설명

BP : bottom laser power (mW)
 C_p : specific heat capacity (J/m³ °C)
 D : layer thickness (nm)
 E : electronic field
 H : magnetic field
 K : conductivity (W/m °C)
 N : reflective index
 ODPR : overpower ratio
 r₀ : gaussian radius
 T : temperature (°C)
 T_{amb} : ambient temperature (20°C)
 t_d : delay pulse time (ns)

t_w : overpower pulse time (ns)

WP : writing laser power (mW)

1. 서론

정보저장 장치의 하나인 광디스크는 오래 전부터 자기 메모리 장치와 함께 정보저장 매체로 각광을 받으며 고용량화, 고속화를 위해 끊임없이 개발되고 있다. 특히 1988년 개발되어 상품화된 추기형 광디스크(CD-R)는 현재 가장 많이 사용되고 있는 정보 저장매체이다⁽¹⁾.

추기형 광디스크에서는 정보를 저장하기 위해 레이저를 디스크의 색소층에 조사시켜 흡수되는 에너지로 색소를 분해하여 기록마크를 생성하게 된다. 기록마크 생성을 위해 매우 짧은 시간동안 국소적인 영역에서 온도를 높게 상승시켜야 하므로 고배속일수록 요구되는 레이저의 파워가 증가

* 연세대학교 기계공학과 대학원

† 책임저자, 회원 연세대학교 기계공학과
 Email : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)32-2159

** 삼성전자 ODD 사업부

되고 있다. 따라서 Cross-talk나 Cross-erase와 같은 열간섭 문제가 발생되어 광디스크의 열해석에 대한 중요성이 더욱 커지고 있다.

Mansurpur등^(2,3)은 다층박막에 대해 수치적으로 에너지 흡수율을 구하고 유한 차분법(FDM)을 이용한 열전달 해석을 수행하였으며 Shih⁽⁴⁾는 Green's function 기법을 이용한 해석적인 방법으로 열전달 문제에 접근하였다. Hongslag등⁽⁵⁾은 여러 가지 실험과 수치해석을 통하여 추기형 광디스크의 기록과정에서 발생하는 열전달 현상에 대해 발표하였다. Suh등⁽⁶⁾은 잠열의 영향을 고려한 수치적인 연구를 하였으며 Huh등⁽⁷⁾은 유한차분법(FEM) 상용 코드를 이용하여 열해석과 함께 열응력 해석을 수행한 바 있다. 이러한 열해석의 중요성에도 불구하고 국내에서는 광디스크에 대한 기본적인 열전달 연구가 미진한 상태이다. 또한 기록마크 형성에 필요한 최적의 파워 및 write strategy 예측에 대한 기초적인 자료를 제공할 수 있는 열전달 연구가 매우 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 추기형 광디스크에 대한 열전달 해석을 통하여 디스크 내에서의 온도변화를 살펴보았으며 최적의 기록마크 생성에 필요한 레이저 파워에 대해 고찰하였다. 또한 색소층 두께 및 열적 물성치들의 변화가 최적의 기록마크 생성에 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구를 수행하였다.

2. 이론 및 수치해석

2.1 해석대상 및 지배방정식

Fig. 1은 본 연구에서 해석하고자 하는 추기형 광디스크의 일반적인 4층 구조를 나타낸 것으로 광디스크에 조사되는 레이저가 원형 대칭이라고 가정하여 R-Z 좌표계를 고려하였다.

광디스크의 다층구조에 대한 열전달 해석을 위해 적용되는 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$C_{P_n} \frac{\partial T}{\partial t} = K_n \nabla^2 T + G \quad (1)$$

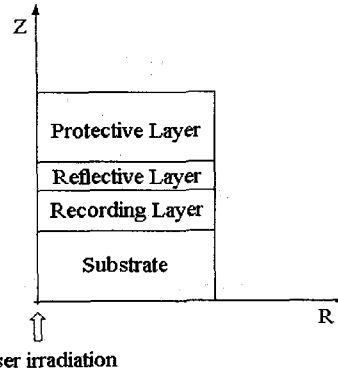


Fig. 1 Structure of multi-layer in CD-R

여기서 G 는 레이저에 의해 흡수되는 단위체적당 에너지율이며 이는 다음과 같이 나타내어진다.

$$G = \frac{2P}{\pi r_o^2} \exp\left[-\left(\frac{2r}{r_o}\right)^2\right] \frac{dY(z)}{dz} \quad (2)$$

$$Y(z) = \frac{1}{2} \operatorname{Re}[E(z)H(z)^*] \quad (3)$$

여기서 $dY(z)/dz$ 는 Z 방향에 대한 에너지의 흡수율을 나타낸다. 다층구조에 대한 Maxwell equation으로부터 전기장과 자기장이 구해지면 ponyting vector theorem에 의해 식(3)과 같이 결정되어 진다⁽²⁾.

2.2 해석조건 및 가정

본 연구에서 수치해석에 이용된 경계조건은 다음과 같다.

$$T(r, z = \pm\infty, t) = T_{amb} \quad (4)$$

$$T(r = \infty, z, t) = T_{amb} \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(r = 0, z, t)}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

색소층과 반사층에 비해 보호층과 기판의 두께가 매우 크므로 계산시 충분히 큰 값이 필요하다. 따라서 선행연구로 보호층과 기판의 두께 변화에 따른 계산을 하여 결과에 영향을 주지 않는 값을 보호층과 기판의 두께로 선택하였다. 그 값들은 Table 1과 같다.

Table 1 Physical properties of multi-layer used in the calculation

	D	K	C_p	$N(\text{at } \lambda = 780\text{nm})$
Substrate (PC)	500	0.2	1.512×10^6	1.6
Recording layer (Dye)	150	02	2.25×10^6	$2.5 - i0.05$
Reflective layer (Au)	70	249	3.17×10^6	$0.16 - i3.0$
Protective layer (UV)	480	0.2	1.512×10^6	1.6

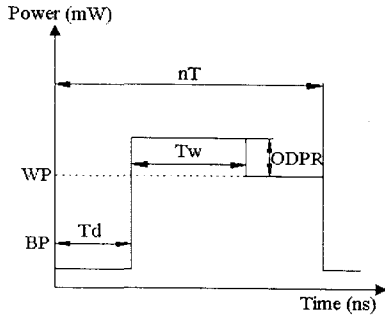


Fig. 2 Write strategy on CD-R

Table 2 Write strategy for various recording speed

speed	t_d	t_w	ODPR(%)	BP
2x	1.0T	1.25T	20	1.08
4x	0.75T	1.5T	20	1.08
8x	0.5T	1.75T	20	1.08
12x	0.5T	1.75T	20	1.08

또한 Table 1은 두께와 함께 계산에 사용된 각 층에 대한 열적, 광학 물성치를 나타낸 것으로 열적 물성치는 온도에 대해 일정하다고 보았다. 계산을 간단히 하기 위하여 광디스크의 다층구조를 평면으로 생각하였으며 beam spot size는 계산 영역 내에서 670 nm로 일정하다고 가정하였다. 본 연구에서는 Gaussian 분포형태의 파장이 780 nm인 적색 레이저를 고려하였다.

디스크가 일정한 배속을 갖고 움직이므로 이를 계산하기 위하여 Mansuripur등⁽³⁾이 사용한 중첩법

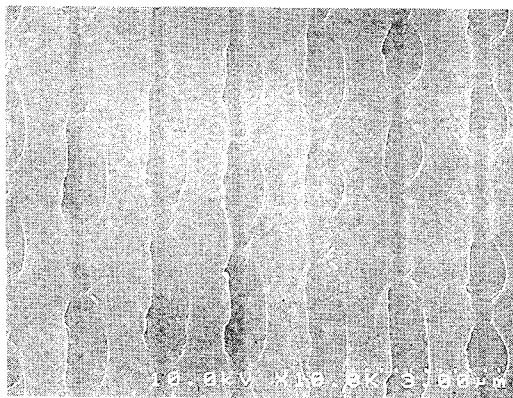
을 3-D code와 비교한 결과, 계산결과의 차이가 거의 없어 본 연구에서는 빠른 계산을 위해 중첩법을 이용하였다.

Fig. 2는 추기형 광디스크의 기록에 사용되는 일반적인 write strategy를 나타낸 것으로 배속에 따라 write strategy와 파워가 달라지게 된다. 본 연구에서는 배속에 따라 Table 2와 같은 write strategy를 계산에 사용하였다. 여기서 1배속인 경우, 1T는 231.4 ns의 시간을 의미하며 배속의 증가에 따라 1T의 시간은 반비례한다. 따라서 8배속인 경우 1T의 시간은 29 ns가 된다.

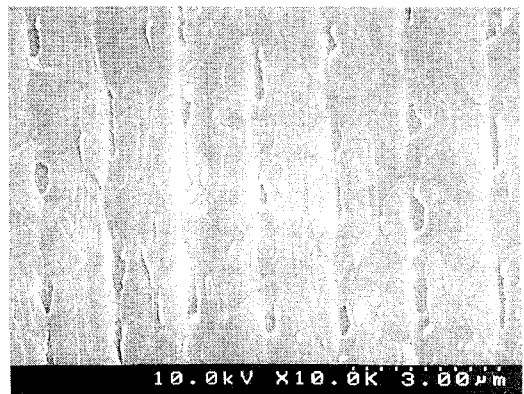
3. 결과 및 고찰

3.1 기록마크 형상 관찰

본 연구에서는 수치 해석에 앞서 레이저의 파워에 따라 실제적으로 기록마크 형상이 어떻게 달라지는가에 대한 실험을 수행하였다. 다이오드 레이저 제품의 CD-R을 실험에 사용하였으며 기록 속도는 12배속으로 일정하게 두고 동일한 write strategy를 적용하여 기록하였다. 실험 변수로 레이저 파워를 20 mW에서 36 mW까지 변화시켜 기록한 후, SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 기록층의 표면을 관찰하였다. Fig. 3은 각각 레이저 파워가 28 mW와 36 mW일 때의 경우에 대해 관찰된 표면을 보인 것이다. 레이저 파워에 따라 기록된 마크의 크기와 형상이 크게 달라짐을 알 수 있다. Fig. 3 (a)와 같이 레이저 파워가 28 mW인 경우 이론적인 기록마크와 비



(a) writing power = 28mW



(b) writing power = 36mW

Fig. 3 SEM images on surface of recording layer

슷한 기록마크가 생성된 것으로 관찰된다. 36 mW와 같이 높은 레이저 파워가 조사된 경우인 Fig 3(b)를 살펴보면 레이저의 파워가 집중된 영역에서 색소가 모두 분해되어 색소층의 아래 위치한 기관까지 열변형을 일으킨 것을 쉽게 알 수 있다. 크게 형성된 기록마크로 인해 주변의 기록마크에 대해 열간섭 문제를 일으킨 것으로 예측된다. 본 연구에서는 이러한 실험을 통해 레이저 파워에 따른 기록마크 크기에 대한 정성적인 변화를 확인할 수 있었다.

3.2 시간 변화에 의한 온도분포

시간에 따른 다층구조에서 온도변화를 보기 위해 Fig. 2와 같은 3T의 write strategy로 조사되고, 이후 3T동안은 bottom power만이 조사되는 8배속의 경우에 대해 계산을 수행하였다. Fig. 4는 8배속인 경우 60 ns후 레이저의 광축이 지나가게 되는 지점인 R=600 nm에서 시간에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이 온도는 색소층 영역 내에서 최대값을 나타내게 되는데 이러한 온도분포를 통해 색소의 분해가 진행되고 있음을 판단할 수 있다.

레이저의 write strategy와 관련하여 살펴보면 bottom power만이 조사되는 15 ns까지 온도의 상승은 거의 없다가 writing power 조사가 시작되는 15 ns이후부터 레이저 파워의 증가로 인한 급격한 온도상승이 일어나게 된다. 광축이 600 nm 위치를 지나가게 되는 60 ns 이후에도 상승되어 80 ns지점에 이르러 가장 최고의 온도에 도달하게 된다. writing power의 조사가 끝나고 bottom power만이 조사되는 90 ns이후에는 온도분포는 주변으로의 확산을 통해 서서히 하강하는 경향을 보인다. 반사층에서는 매우 낮은 온도를 보이게 되는데 이는 반사층이 매우 높은 열전도도를 갖는 금으로 이루어져 반경방향으로 빠르게 열을 전달하기 때문이다. 기관과 색소층 경계면의 온도를 살펴보면 200°C 이상으로 증가되는 것으로 나타나는데 이러한 온도분포는 색소층과 인접한 기관에서 열팽창을 통해 수십 nm크기의 돌출부가 발생되는 실제적인 현상을 설명할 수 있다.

Fig. 5는 최대 온도값을 갖는 색소층의 위치에서 R방향에 대한 온도분포를 나타낸 것이다. 온도의 분포는 Fig. 4와 마찬가지로 write strategy에

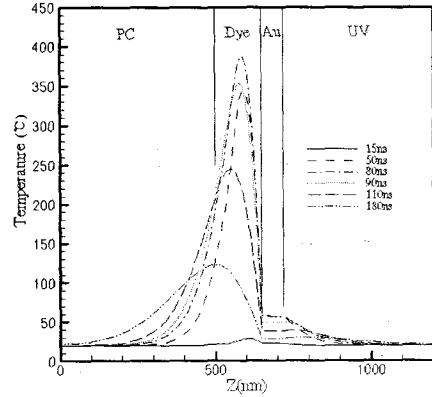


Fig. 4 Temperature profile at R=600 nm

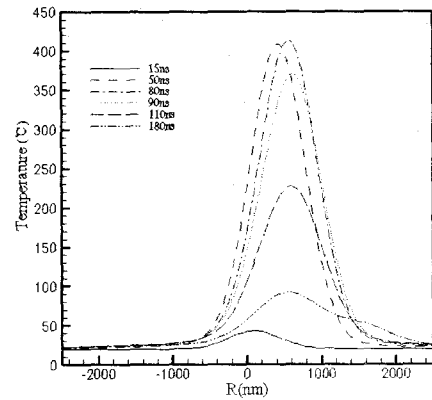


Fig. 5 Temperature profile in the dye layer

따라 온도의 갑작스런 상승 이후에 점차적인 감소를 보이고 있다.

3.3 레이저 파워 변화에 대한 기록마크의 크기

본 연구에서는 일반적인 색소의 분해온도가 300°C이므로 색소층의 온도가 분해 온도를 넘게 되면 기록마크가 생성되었다고 가정하여 기록마크의 크기를 결정하였다⁽⁸⁾. Fig. 6은 레이저의 파워 변화에 따른 기록마크의 형상을 보인 것이다. 레이저의 writing power가 각각 12 mW, 16mW, 20 mW인 경우 레이저 이송 방향에 대한 기록마크의 길이는 각각 400 nm, 830 nm, 1000 nm로 나타나고 있다. 계산 결과를 3T 기록마크의 이론적인 길이 830 nm와 비교해보면 16 mW가 정확하게 기록마크를 생성시키는 최적의 파워임을 알 수 있다.

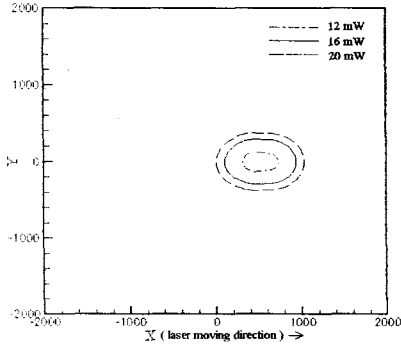


Fig. 6 Recording mark size for various laser power (3T mark case)

그림에서와 같이 최적의 기록마크를 형성하는 16 mW를 기준으로 파워의 증감에 따라 기록마크 크기의 변화가 나타나게 된다. 파워가 12 mW인 경우에는 작게 형성된 기록마크의 길이로 인해 기록한 정보를 재생시 부정확한 신호가 검출되며 최적의 파워보다 큰 20 mW의 경우에는 크게 형성된 기록마크로 부정확한 신호와 함께 주변의 기록마크에도 열적으로 영향을 주는 열간섭 문제가 발생될 것으로 예측할 수 있다.

광디스크에서는 EFM(Eight Fourteen Modulation)을 사용하여 정보를 기록하기 때문에 기록마크의 형상은 최소 기록마크 길이인 3T 마크에서부터 최대 기록마크 길이인 11T 마크까지 총 9개의 기록마크가 색소층에 생성되게 된다. Fig. 7은 3T 마크와 동일한 write strategy에서 7T 및 11T 마크 경우에 대해 계산하여 이론적인 기록마크의 길이와 비교한 것이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이

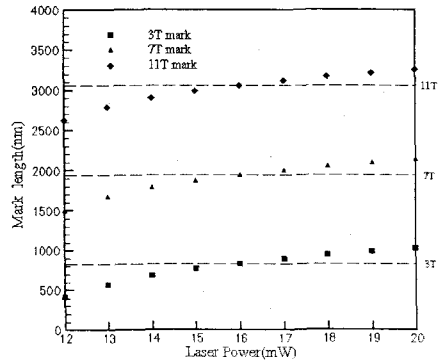
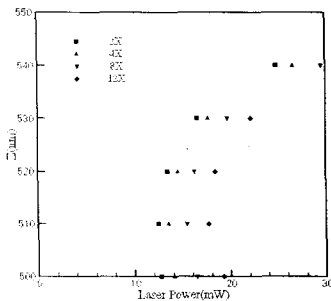


Fig. 7 Recording mark sizes for various laser power

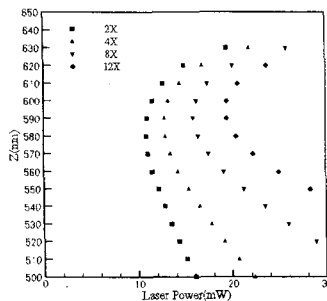
7T 및 11T마크에서도 최적의 파워가 3T마크의 경우와 같음을 알 수 있다. 정보 기록시 실제 3T 마크에 대한 write strategy가 결정되면 다른 기록마크들의 경우도 거의 동일한 write strategy를 사용하게 되므로 이러한 열전달 해석이 실제의 경우와 정성적으로 타당하다고 볼 수 있다. 따라서 최적의 기록마크에 대한 파워를 비교할 때 최소 기록마크 길이인 3T 기록마크만을 고려해도 최적의 파워를 찾는 것이 가능하다고 사료된다.

3.4 배속 및 색소층 두께의 영향

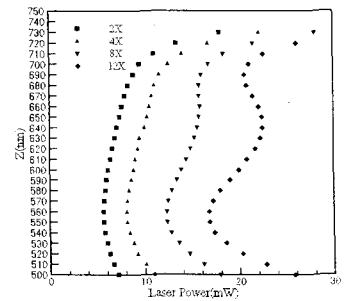
본 연구에서는 1.2 m/s를 1배속 기준으로 하여 각각 2배속, 4배속, 8배속, 12배속의 변화에 따라 요구되는 최적의 파워를 계산하였다. Fig. 8은 배속이 증가함에 따라 요구되는 최적의 파워가 점차적으로 증가되는 것을 보이고 있다. 배속이 증



(a) dye layer thickness=50 nm



(b) dye layer thickness=150 nm



(c) dye layer thickness=250 nm

Fig. 8 Optimum power variation for dye thickness and recording speed

가 될수록 동일한 기록마크를 기록하기 위한 시간이 줄어들게 되므로 보다 높은 파워와 짧은 t_d 를 갖는 write strategy가 필요하게 된다.

Fig. 8은 배속의 변화와 함께 색소층의 두께가 각각 50 nm, 150 nm, 250 nm이라고 할 때 색소층 내에서의 위치에 따른 최적의 파워값을 나타낸 것이다. Fig. 8(a)의 색소층이 50 nm이고 8배속인 경우, 색소층과 기판의 경계면으로부터 10 nm의 위치에서 최적의 파워값이 15.5 mW로 보이고 있다. 마찬가지로 Fig. 8의 (b)와 (c)로부터 150 nm인 경우에는 90 nm 떨어진 위치에서 16 mW로, 250 nm인 경우는 60 nm 떨어진 위치에서 12 mW의 값이 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 색소층의 두께에 따른 최적 파워가 변하게 되는데 이는 색소층 두께의 변화로 인해 에너지 흡수율이 변화하기 때문이다. 따라서 이러한 색소층에 두께에 대한 변화가 최적의 기록 파워를 결정하는데 매우 중요한 파라미터임을 알 수 있다.

Fig. 8(c)로부터 2배속, 4배속에서는 색소층의 위치에 따라 색소층과 기판의 경계면으로부터 50 nm 떨어진 위치에서 한 개의 극대값이 형성된다. 하지만 8배속, 12배속의 경우에는 50 nm 위치에서와 함께 200 nm 정도에서 파워에 대한 두 번째 극대점이 나타나고 있다. 이러한 값은 색소층이 250 nm인 경우 에너지 흡수율이 각각 50 nm와 200 nm에서 2개의 극대점이 발생되는데 8배속이나 12배속과 같이 고배속인 경우 색소층내에서 주변으로 열전달 되는 시간이 매우 짧아서 나타나는 것으로 판단된다.

3.5 열적 물성치의 영향

광디스크의 색소층이나 반사층과 같은 매우 얇은 박막에서는 열적 물성치가 재료의 평균값에 비해 대부분 낮은 값을 갖는 것으로 알려지고 있다⁽⁹⁾. 따라서 정확한 계산을 위해서는 평균값이 아닌 얇은 박막에 대한 열적 물성치값이 요구된다. 본 연구에서는 다른 연구들에서 사용된 평균값을 이용하였지만 박막에서의 불확실성이 예상되어 열적 물성치 값의 변화에 따른 영향을 살펴 보았다.

Fig. 9는 색소층과 반사층의 열전도도와 비열을 기존의 계산에 수행된 평균값에 대해 0.1배에서 0.9배까지 변한다고 가정하여 계산한 최적의 파

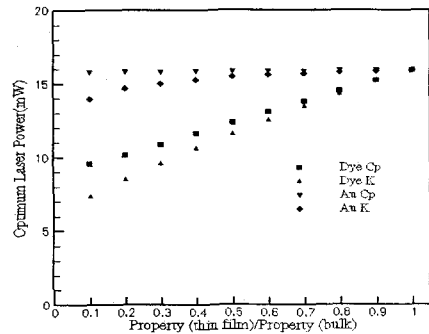


Fig. 9 Optimum power variation for thermal property

워값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 반사층의 열적 물성치의 변화는 파워에 영향을 적게 미치는 반면에 색소층의 열적물성치값의 변화는 최적 파워에 대해 큰 영향이 주어지는 것을 알 수 있다. 열적 물성치값이 평균값에 비해 작아질수록 필요로 하는 최적 파워의 값이 작아짐을 확인 할 수 있다. 색소층의 온도는 열전도도가 작아질수록 흡수되는 에너지가 주변으로 전달되는 양이 감소되고 또한 비열이 작아질수록 단위 체적당 온도 변화율이 증가되어 필요로 하는 최적의 파워는 점점 감소되는 경향을 보이게 된다.

4. 결론

본 연구에서는 수치적인 방법을 통해 추기형 광디스크에 대한 열전달 해석을 수행하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

시간의 변화에 대한 온도분포를 계산하여 추기형 광디스크 내에서 일어나는 온도상승 현상을 이해할 수 있었다. 레이저 파워의 증감에 따른 기록마크의 크기 변화를 확인할 수 있었으며 최적의 기록마크 크기와 비교하여 최적의 파워를 예측할 수 있었다. 최소의 기록마크 길이인 3T 마크 경우에 대한 최적의 파워는 다른 기록마크 길이에도 동일하게 적용이 가능하였다. 여러 가지 계산 조건을 변화한 결과 색소층의 두께, 열적물성치가 최적의 파워에 대한 변화에 크게 영향을 주는 것으로 확인되었다. 따라서 정확한 두께와 열적 물성치 측정이 필요하며, 본 결과는 향후 보다 실제 현상을 모사하여 최적의 레이저

파워 및 write strategy를 판단할 수 있는 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 삼성전자 ODD사업부와 한국과학재단 지정 정보저장기기연구센터의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) E. Hamada, Y. Takagishi, and T. Yoshizawa, 2000, "Ten-Year Overview and Future Prospects of Write-Once Organic Recordable Media," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part I, No. 2B, pp. 785-788.
- (2) M. Mansuripur, G. A. N. Connell, and J. W. Goodman, 1982, "Laser-induced local heating of multilayers," Applied Optics, Vol. 21, No. 6, pp. 1106-1114.
- (3) M. Mansuripur, and G.A. N. Connell, 1983, "Laser-induced local heating of multilayers," Applied Optics, Vol. 22, No. 5, pp. 666-670.
- (4) O. W. Shih, 1994, "A multilayer heat conduction solution for magneto-optical disk recording," J. Appl. Phys. Vol. 75, No. 9, pp. 4382-4395.
- (5) A. H. M. Holtslag, E. F. McCord, and G. H. W. Bunning, 1992, "Recording Mechanism of Overcated Metallized Dye Layers on Polycarbonate Substrate," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 31, Part I, No. 2B, pp. 484-493.
- (6) S. Y. Suh., and D. L. Anderson, 1984, "Latent heat effects of pulsed laser beam induced temperature profile in optical recording thin films," Applied Optics, Vol. 23, No. 22, pp. 3965-3971.
- (7) Y. J. Huh, J. S. Kim, T. Y. Nam, and S. C. Kim, 1997, "Deformation Effects and Recording Characteristics of Compact Disc-Recordables," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, Part I, No. 1B, pp. 403-409.
- (8) T. Fujii, T. Tajima, R. Negishi, and I. Okitsu, 2000, "Approach for High Speed Recording of 4.7 GB Disital Versatile Disc-Recordable," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part I, No. 2B, pp. 779-784.
- (9) C. Peng and M. Mansuripur, 2000, "Measurement of the thermal conductivity of erasable phase-change optical recording media," Applied Optics, Vol. 39, No. 14, pp. 2347-2352.