

랜드/그루브 기록형 상변화 광디스크 박막에 대한 열전달 해석

이정두* · 홍성국* · 조형희†

Heat Transfer Analysis on Phase Change Optical Disc with Land/Groove Recording

J. D. Lee, S. K. Hong, H. H. Cho

Key Words: Phase Change Optical Disc(상변화 광디스크), Heat Transfer(열전달), Finite Difference Time Domain(유한차분 시간영역), Land/Groove Recording(랜드/그루브 기록)

Abstract

This study deals with the heat transfer analysis on phase change optical disc with land/groove recording by means of numerical method. Finite difference time domain(FDTD) method was used to obtain the amount of absorption of light propagating inside disc and finite difference element(FEM) method was used to calculate the temperature distribution. The calculated results present the detailed information of recording characteristics on the phase change optical disc. The temperature profiles are quite different between the land track and the groove track. The recorded mark shape on land track is smaller and more elliptic than that on groove track. It is shown that the thermal problem to the neighboring track takes place due to secondary peaks. It is found that the different write strategy should be applied to land and groove recording, respectively.

기호설명

C_p	: specific heat capacity
D	: layer thickness
E	: electronic field
H	: magnetic field
K	: thermal conductivity
T	: temperature
ϵ	: electrical permittivity
μ	: magnetic permeability
σ	: electric conductivity

1. 서론

광디스크는 가장 많이 사용되고 있는 정보저장 매체로서 사회적 요구에 맞는 고용량화, 고속화 특성의 광디스크들이 계속적으로 개발되고 있다. 광디스크에는 기록 방식에 따라 1회 기록형 광디스크와 재기록형 광디스크로 나누어지며 비결정질과 결정질 상태의 반사율 차이를 이용한 상변화 광디스크는 하드 디스크와 같이 정보를 여러 번 쓰고 지울 수 있는 장점으로 인해 많은 관심을 받고 있다. 이러한 상변화 광디스크도 1회 기록형 광디스크와 같이 레이저를 조사하여 기록마크를 생성시킴으로써 정보를 저장시키게 되며 기록마크 생성을 위해서는 매우 짧은 시간동안 국소적인 영역을 용융온도 이상으로 상승시키고 급랭시켜야 하므로 최적의 레이저 파워와 write strategy를 결정하고 제어하는 것은 매우 중요하다. 또한 최근 들어 정보저장 매체의 고밀도화를

† 책임저자, 회원 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

* 연세대학교 기계공학과 대학원

이루기 위해 기록마크를 랜드나 그루브 한쪽에만 기록하지 않고 랜드와 그루브의 모든 영역에 기록하는 랜드/그루브 기록기술이 많은 관심을 받고 있으며 현재 고밀도 상변화 광디스크인 DVD-RAM에 적용되고 있다. 하지만 랜드/그루브 기록기술은 기록되는 영역이 달라지고 기록마크 간의 간격이 좁아지기 때문에 보다 많은 열적 문제가 발생될 것으로 예상되고 있다. 따라서 랜드/그루브 기록형 상변화 광디스크에서 기록마크 제어 및 기록마크 간의 열적 문제를 해결하기 위해서는 랜드/그루브 기록에 대한 열전달 해석이 필요하다.

최적의 기록마크 제어를 위해 많은 연구자들에 의해 상변화 광디스크에 대한 열전달 해석이 이루어졌다. Mansuripur 등⁽¹⁾은 광디스크 다층박막에 대해 해석적인 방법을 통해 에너지 흡수율을 구하고 유한 차분법(FDM)을 이용하여 열전달 해석을 수행하였다. Minemura 등⁽²⁾은 광디스크 구조를 단순평판으로 가정하고 기록속도에 따른 온도분포를 계산하여 광디스크 설계에 대한 자료를 제공한 바 있다. Chou 등⁽³⁾도 여러 가지 설계인자들의 변화에 따른 상변화 광디스크의 열해석을 수행하였다. 최근에는 광디스크 내에서의 보다 정확한 전자기장 계산을 위해서 FDTD 방법을 이용한 연구들이 발표되고 있다^(4,7). Nishi 등⁽⁴⁾은 각각 랜드 영역과 그루브 영역에 대한 에너지 흡수율을 구하고 이를 단순평판에 대한 결과와 비교하였다. Peng 등^(5,6)은 기하학적 조건이 다른 랜드/그루브를 가진 광디스크들에 대한 온도분포를 비교하였으며 투과 전자현미경(TEM)을 이용하여 기록된 마크형상의 차이를 보고하였다. 또한 Meinders 등⁽⁷⁾은 고밀도 상변화 디스크에 대한 열전달 해석을 통해 랜드/그루브 기록으로 인해 발생하는 열적 문제에 대해 연구를 수행하였다. 이와 같이 상변화 광디스크의 랜드/그루브 기록에 대한 열해석의 중요성에도 불구하고 국내에서는 이에 대한 연구가 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 랜드/그루브 형상이 고려된 상변화 광디스크에 대한 열전달 해석을 통하여 상변화 광디스크 내에서의 기록 특성을 고찰하였다. 또한 고밀도 기록 방식인 랜드/그루브 기록기술에 대한 열적 문제와 기록마크 제어에 대한 정보를 얻기 위해 랜드 기록과 그루브 기록에 대한 열전달 해석을 수행하였다.

2. 이론 및 수치해석

2.1 해석대상 및 해석방법

Fig. 1은 해석하고자 하는 상변화 광디스크의 일반적인 6층 구조를 나타낸 것으로 1회 기록형 광디스크와는 다르게 기록층은 유전체층 사이에 놓여 있게 된다. 이러한 광디스크는 트랙킹과 포커싱 제어 및 디스크의 자체 정보를 담기 위해 그림과 같은 랜드/그루브의 사다리꼴 구조를 갖게 된다.

그림에서와 같은 사다리꼴 구조인 광디스크 내에서의 온도분포를 계산하기 위해서는 먼저 전자기장 해석이 이루어져야 되며 이는 식 (1)과 (2)로 나타내어지는 3차원 맥스웰 방정식을 계산해야 한다.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{E} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \vec{H} - \frac{1}{\epsilon} (\vec{j}_{source} + \sigma \vec{E}) \quad (2)$$

맥스웰 방정식을 이용하여 광디스크 다층구조에 대한 전자기장이 계산되면 기록층 내에서 흡수되는 에너지량은 다음과 같은 식으로 구해진다. 여기서 G 는 단위 체적당 흡수되는 에너지량을 의미한다.

$$G = \frac{1}{2} \sigma |\vec{E}|^2 \quad (3)$$

전자기장 계산에 의해 구해진 에너지 흡수량은 광디스크 다층구조에 대한 식 (4)와 같은 에너지 방정식에 적용되어 광디스크 내에서의 온도분포를 구하게 된다.

$$C_{P_n} \frac{\partial T}{\partial t} = K_n \nabla^2 T + G \quad (4)$$

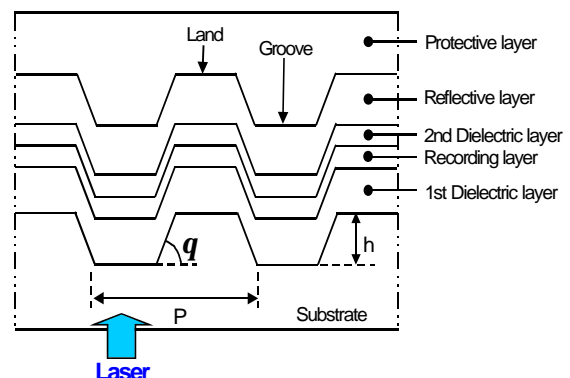


Fig. 1 Schematic of the simulated optical disc

본 연구에서는 랜드/그루브 형상을 가진 실제 광디스크를 모사하기 위해서 2개의 상용 프로그램을 이용하였다. 먼저 다층박막내의 전자기장은 3차원 FDTD (Finite Domain Time Difference) 프로그램인 XFDTD(ver 5.3)로 계산하였으며 이후에 3차원 FEM (Finite Element Method) 프로그램인 ANSYS(ver 6.1)를 이용하여 광디스크 다층박막내의 온도분포를 구하였다.

2.2 해석조건 및 가정

본 연구에서는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 사다리꼴의 랜드/그루브 형상을 구현하기 위해 트랙폭 (p), 그루브 각도(θ), 그루브 높이(h)를 각각 1140 nm, 66° , 80 nm로 적용하였으며 랜드와 그루브의 폭은 동일하게 570 nm로 고려하였다. Table 1은 본 연구에 해석하고자 하는 상변화 광디스크인 DVD-RAM의 각층에 대한 열적, 광학적 물성치를 나타낸 것으로 열적 물성치는 온도에 대해 일정하다고 보았다. 또한 광디스크에서 기판과 보호층의 두께는 기록, 반사, 유전체층에 비해 매우 크지만 선형계산을 통해 결과에 영향을 미치지 않는 범위내의 두께를 선택하여 계산에 이용하였다. 광디스크에 조사되는 레이저는 파장이 650 nm이고 beam spot size가 450 nm인 Gaussian 분포를 갖는다고 가정하였다.

Fig. 2는 본 계산에서 적용한 레이저의 write strategy를 나타낸 것으로 그림에서 같이 직사각형 형태의 write strategy를 적용하였다. 기록파워를 7 mW로 하여 100 ns동안 조사한 다음 100 ns동안은 기본파워 1 mW만 조사되는 조건으로 계산을 수행하였으며 모든 계산 경우에 광디스크 이송속도는 없는 정지된 상태로 가정하였다.

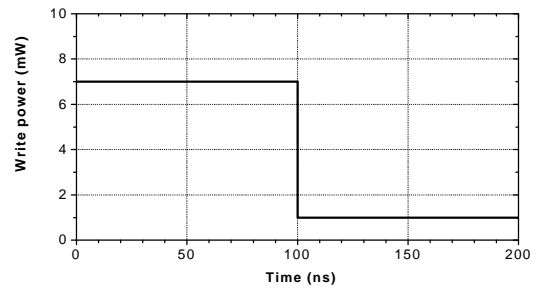


Fig. 2 Write strategy used in the calculation

결과 및 고찰

3.1 상변화 광디스크 내에서 온도분포의 변화

본 연구에서는 상변화 광디스크에서의 열전달 특성을 파악하기 위해 시간에 따른 다층구조에서의 온도변화를 계산하였다. Fig. 3은 조사되는 레이저의 중심 위치에서 시간이 변화함에 따라 온도분포가 어떻게 달라지는 가를 보인 것이다. 여기서 T_m 은 기록층 재료의 용융온도를 나타내며 일반적으로 600°C 에 해당된다. 그림에서 볼 수 있듯이 기록파워가 가해지면서 급격한 온도 상승이 일어나다가 100 ns이후에 기본파워만 조사되면서 다시 급격히 냉각되고 있음을 알 수 있다. 특히 기록층과 첫 번째 유전체층의 경계에 해당되는 온도값은 20 ns이후부터 기록층의 용융온도 이상으로 올라간 후에 급격히 냉각이 진행되므로 이 영역부터 기록마크가 생성되고 있음을 예측할 수 있다. 이에 비해 반사층에서는 시간에 관계없이 매우 낮은 온도를 보이게 되는데 이는 반사층이 매우 높은 열전도도를 갖는 금속재질이므로 반경방향으로 빠르게 열을 전달하기 때문이다.

Table 1 Physical properties of DVD-RAM used in the calculation

	D (nm)	K (W/m $^\circ\text{C}$)	C _p (J/m 3 $^\circ\text{C}$)	Refractive index
Substrate (PC)	200	0.23	1.70×10^6	1.58
1st Dielectric layer (ZnS-SiO ₂)	85	0.58	2.00×10^6	2.10
Recording layer (Ge ₂ Sb _{2.3} Te ₅)	25	0.60	1.28×10^6	4.6 - <i>i</i> 4.2
2nd Dielectric layer (ZnS-SiO ₂)	25	0.58	2.00×10^6	2.10
Reflective layer (Al alloy)	100	20.0	2.45×10^6	1.8 - <i>i</i> 6.0
Protective layer (UV)	200	0.20	1.70×10^6	1.58

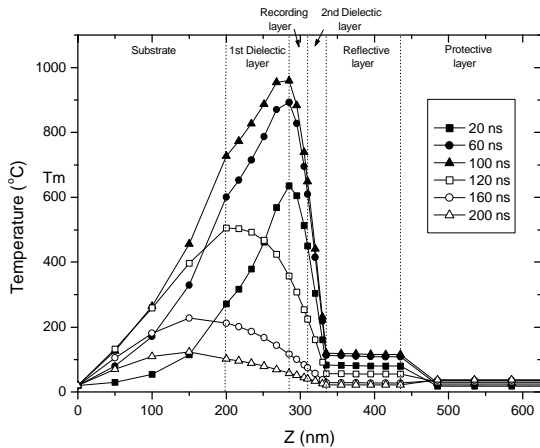


Fig. 3 Temperature profile at the various time

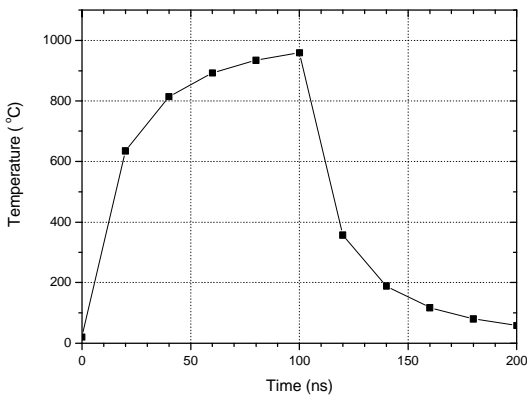


Fig. 4 Temperature history in the recording layer

이러한 반사층 주변으로의 빠른 열확산에 의해 시간이 지남에 따라 온도의 최고점은 기록층에서 기관으로 점점 이동됨을 볼 수 있다. 예측된 온도분포는 1회 기록형 광디스크와 유사한 경향을 갖게 되지만 상변화 광디스크의 경우에는 매우 고온의 온도와 빠른 냉각속도가 요구됨으로 기록층과 함께 유전체층 및 반사층의 열적 물성치과 두께에 대한 중요성은 더욱 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 4는 기록층에서의 온도변화를 보다 자세히 관찰하기 위해 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 용융온도 (600°C) 이상으로 올라간 후 온도상승률이 감소되다가 기본파워만 조사되는 시점인 100 ns이후부터 120 ns사이에서 급격하게 온도가 감소하는 급랭과정을 확인할 수 있다.

3.2 랜드 기록과 그루브 기록에 따른 온도분포

고밀도 상변화 광디스크인 DVD-RAM 경우에는 랜드나 그루브의 한쪽 영역만을 기록하지 않고 랜드와 그루브 영역을 모두 사용하는 랜드/그루브 기록기술이 적용되고 있다. 그러나 이러한 기록기술은 이웃 트랙에 기록된 마크와의 간격을 더욱 좁게 하고 마크가 기록되는 영역인 랜드와 그루브의 형상이 다르기 때문에 마크 기록시 보다 정밀한 제어가 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 랜드 기록과 그루브 기록에 따른 기록 특성의 변화에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 5와 6은 기록영역이 각각 랜드와 그루브인 경우에 기록파워를 7 mW로 100 ns동안 조사된 시점에서 기록층의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 경우 모두 조사되는 레이저의 중심 지점인 X=0 nm, Y=0 nm에서 최고값이 나타나고 있으며 비슷한 온도값을 보이고 있다. 또한 랜드/그루브 형상을 고려하지 않은 기

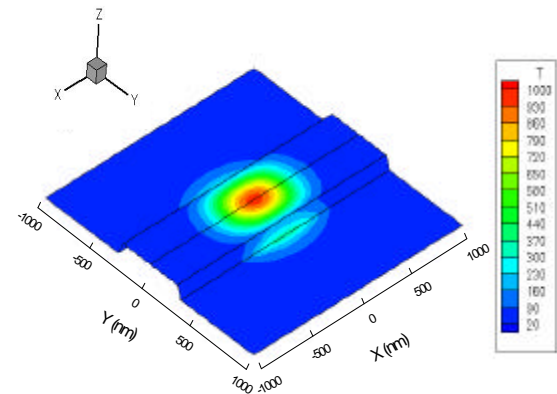


Fig. 5 Temperature contours at land recording

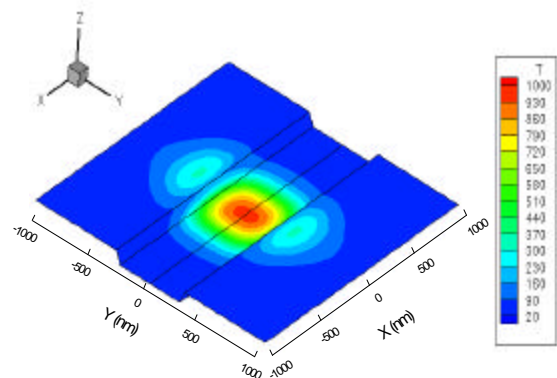


Fig. 6 Temperature contours at groove recording

존의 단순평면 해석결과에서 나타난 중심축으로부터 멀어질수록 단순 감소되는 온도분포와는 다르게 감소되다가 다시 증가되는 2차 peak를 보이고 있다. 하지만 전체적으로 랜드 기록과 그루브 기록의 온도분포는 상이하게 나타나고 있다. Fig. 7은 랜드 기록과 그루브 기록에서의 온도분포 차이를 보다 자세하게 비교하기 위해 등온선들을 나타낸 것으로 등온선의 온도는 각각 900, 600, 300°C이다. 그림에서 나타나는 랜드 기록과 그루브 기록의 온도분포 차이는 랜드와 그루브의 기하학적 형상차이에 의한 것이다. 랜드와 그루브 경계면의 기하학적 차이에 의해 이 영역에 조사되는 레이저의 굴절 및 반사 특성이 달라지면서 전체적으로 기록층에서 에너지 흡수율의 변화를 가져오게 된다. 이러한 에너지 흡수율의 변화는 그대로 랜드와 그루브의 온도차이를 발생시키게 된다.

상변화 광디스크에서 기록마크의 형상을 정확하게 예측하기 위해서는 상변화 모델링을 통한 해석이 이루어져야 한다. 하지만 정확한 모델링을 통한 마크형상 예측은 아직도 매우 어려운 과제이며 대략적인 마크형상 예측은 온도분포를 통해서도 가능하다. 따라서 본 연구에서는 기록층 재질의 용융온도인 600°C를 기준으로 마크형상을 예측하였다. Fig. 7에서 나타나듯이 마크형상은 랜드에 기록한 경우에 상대적으로 가늘고 둥근 타원형의 형상을 갖게되는 반면, 그루브에 기록한 경우에는 마크폭이 랜드와 그루브 경계 부분까지 넓게 형성되는 사각형상을 갖는 것으로 예측되고 있다. 본 연구에서 예측된 랜드와 그루브에서의 마크형상 특징은 TEM을 이용하여 기록마크 형상을 제시한 문헌과 일치하는 결과를 보이고 있다⁽⁵⁾. 이와 같이 동일한 조건에서 랜드 기록과 그루브 기록은 마크형상의 차이를 가져오게 되므로 동일한 마크를 기록하기 위해서는 랜드 기록과 그루브 기록에 적용되는 write strategy가 달라져야 됨을 확인할 수 있다.

상변화 광디스크에서 기록재질의 중요한 특징은 비결정화 상태에서 재결정화 온도(300°C) 이상으로 상승된 후에 서서히 냉각이 이루어지면 결정화 상태로 변화하게 되는 점이다. 따라서 상변화 광디스크에 마크를 기록하는 과정에서 축적된 에너지 확산으로 인해 이웃한 트랙을 재결정화 온도 이상으로 상승시키게 되면 비결정화 상태의

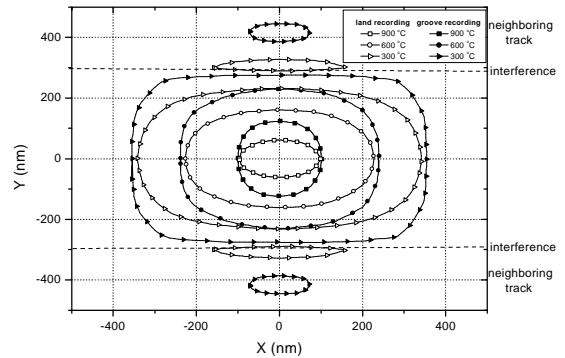


Fig. 7 Isotherms in the recording layer

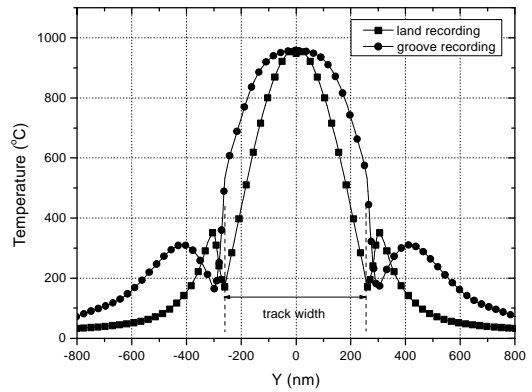


Fig. 8 Comparison of land recording with groove recording in the mark width direction

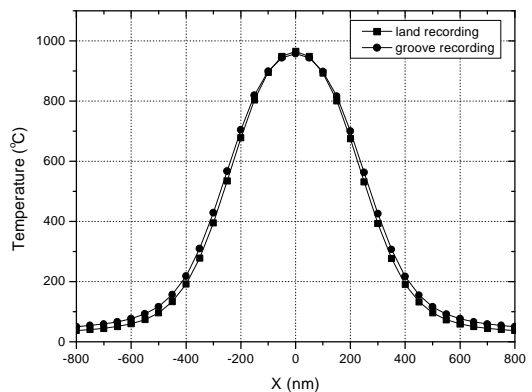


Fig. 9 Comparison of land recording with groove recording in the mark length direction

기록마크를 결정화 상태로 변화시켜 기록마크를 지우는 cross-erase라는 열적 문제를 발생시키게 된다. 따라서 Fig. 7에서 나타난 재결정화 온도에 해당되는 300°C의 등온선 분포는 열적 문제를 파

악하는 데에 매우 중요한 정보가 된다. 그림에서 볼 수 있듯이 재결정화 온도분포도 랜드 기록과 그루브 기록에서 다르게 나타나고 있다. 본 해석의 경우에는 그루브 기록이 랜드 기록에 비해 2차 peak에 의한 재결정화 온도분포가 이웃한 트랙에 더욱 치우쳐서 발생되고 있다. 따라서 그루브 기록이 랜드 기록보다 큰 열적 문제를 일으킬 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 8과 9는 마크형상과 2차 peak의 차이를 보다 자세히 살펴보기 위해 각각 중심점에서 마크 폭 방향(Y방향)과 마크길이 방향(X방향)의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에 알 수 있듯이 랜드 기록 경우의 온도분포는 그루브 기록 경우에 비해 마크폭 방향에서 빠르게 감소되고 2차 peak는 랜드와 그루브의 경계면 부근에서 발생되고 있다. 하지만 마크길이 방향에서 랜드 기록과 그루브 기록의 온도분포는 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 랜드 기록과 그루브 기록은 마크길이 보다는 마크폭이나 2차 peak에 의한 열적 영향에서 차이가 상대적으로 크게 발생됨을 알 수 있으며 이러한 2차 peak에 의한 열적 문제를 해결하기 위해서도 각기 다른 write strategy가 적용되어야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 랜드/그루브 기록형 상변화 광디스크 박막에 대한 열전달 해석을 위해 FDTD와 FEM방법을 이용하여 다음과 같은 결론들을 얻었다.

시간에 따른 기록층내의 급격한 온도상승과 냉각에 의해 비결정화 상태로 천이되는 현상을 파악할 수 있었다. 랜드/그루브 형상차이에 의한 전자기장의 변화로 인해 랜드 기록과 그루브 기록에서 상이한 온도분포가 발생됨을 확인할 수 있었다. 또한 온도분포를 통해서 예측된 랜드 기록의 마크형상은 그루브 기록의 마크형상에 비해 작은 타원형을 갖는 것으로 나타났다. 랜드 기록과 그루브 기록에서 2차 peak가 발생됨으로 인해 이웃 트랙에 대한 열적 문제가 일어날 것으로 예측되었다. 이러한 결과로부터 보다 정확한 마크를 기록하기 위해서는 랜드 기록과 그루브 기록

에 대해 각각 다른 write strategy가 적용되어야 함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구센터의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) H. Minemura, H. Andoh, N. Tsuboi, Y. Maeda, and Y. Sato, 1990, "Three-dimensional analysis of overwritable phase-change optical disks," *J. Appl. Phys.*, Vol. 67, No. 6, pp. 2731-2735.
- (3) L. H. Chou, C. P. Jen, and C. C. Chieng, 1998, "Application of Simulation on Design of Phase-Change Optical Recording Disks," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 34, No. 2, pp. 414-416.
- (4) Y. Nishi, T. Shimano, H. Kando, M. Terao, and T. Maeda, 2002, "Simulations of Marks Formed on Phase-change Land/Groove Disks," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. 2931-2938.
- (5) C. Peng, and M. Mansuripur, 2000, "Thermal cross-track cross talk in phase-change optical disk data storage," *J. Appl. Phys.*, Vol. 88, No. 3, pp. 1214-1220.
- (6) C. Peng, 2002, "Polarization dependence of thermal behavior in rewritable phase-change optical recording media," *Applied Optics*, Vol. 41, No. 2, pp. 379-385.
- (7) E. Meinders, M. H. R. Lankhorst, H. J. Borg, and M. J. Dekker., 2001, "Thermal Cross-Erase Issues in High-data-Density Phase-Change Recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 1558-1564.