

비정질 TbFe박막의 열자기 기록시 온도분포와 Bit크기의 관계

Relationship Between Temperature Profiles and Bit Size During Thermomagnetic Recording Of Amorphous TbFe Thin Film

이세광*, 박종철*

(Seh-Kwang Lee · Jong-Chul Park)

요 약

광자기 메모리용 재료인 비정질 TbFe박막을 대상으로 열자기 기록시 박막에 분포하는 온도와 이때 만들어지는 bit의 크기간에 상호관련성을 조사하였다. 레이저 조사에 의해 가열된 박막의 온도분포는 유한요소법을 이용한 열전달 해석에 의해 계산하였다. 레이저 가열종료 직전 박막 면에 분포하는 온도 contour로부터 bit크기를 예측하였다. 여기서 bit크기는 온도 상승에 따라 보자력이 약화되어 외부자계와 박막반자장의 합력이 역자구를 만들어 준다고 가정하여 이 경계가 되는 온도(T_{crit})로 이루어지는 등온선의 크기로부터 정하였다.

열자기 기록 실험으로부터 기록 bit의 크기($D_{meas.}$)을 측정하여 레이저조사조건별로 예측한 bit크기($D_{pred.}$)와 비교하였다.

특히, 레이저 pulse시간 변화에 따른 여러온도의 등온선 contour 직경변화를 조사하여 실측한 bit크기와 비교 검토함으로써 bit형성에 미치는 온도분포의 영향을 조사하였다. 이 결과 레이저 pulse시간이 길어지거나 레이저 power가 상대적으로 작을때 실측한 bit크기가 예측된 bit크기보다 커지는 것으로 나타났으며 이는 T_{crit} 온도구배가 완만해질수록 bit경계가 되는 온도가 낮아지는 것으로 해석된다.

ABSTRACT

The correlation between temperature profiles and bit size during static thermomagnetic recording was studied for amorphous TbFe thin film. Temperature profiles developed in thin film by laser irradiation were calculated by heat transfer analysis using the finite element method. The change in the size

*한국과학기술연구원 금속부

of isothermal contours was traced as a function of laser pulse duration time at the laser power levels of 5 ~ 9mW. To correlate the temperature profile with the bit size, the bit formation was assumed to occur in the laser heated region inside which coercivity drop was enough to reverse the domain polarity by the sum of the self-demagnetizing field and the applied field. The bit diameter ($D_{pred.}$) was, then, predicted by the size of the isothermal contour of the critical temperature(T_{crit}) of the formation from the maximum temperature distribution just before laser-off. Recording experiments were carried out at various laser irradiation conditions. The bit diameters($D_{meas.}$) were measured and compared with the predicted ones.

Results showed that $D_{meas.}$ was in general agreement with $D_{pred.}$, but, became larger than $D_{pred.}$ for the longer pulse width as well as the lower laser power levels.

1. 서 론

페리자성(ferrimagnetism)을 갖는 비정질 희토류-전이금속(Rare Earth-Transition metal : RE-TM) 합금 박막을 이용한 광자기(Magneto-optical : MO)메모리는 1 Mbit/mm²에 달하는 고밀도 기록특성과 정보의 소거, 재기록이 가능하여 그 응용성이 크게 기대되고 있다.^{1,2)}

열자기 기록방식은 광자기 메모리에서 정보를 기록하는 방식을 말하며, 박막면에 수직 일방향 자화된 RE-TM 박막에 직경 1 μ m 정도의 레이저 빔을 집속, 가열할 때 박막의 열자기적 반응에 의해 역자구(reverse magnetic domain)를 만들어 주는 것을 뜻한다. 광자기 메모리의 고밀도 정보저장 능력은 submicron 크기의 역자구, 즉 bit의 크기 및 모양의 엄격한 제어기술에 의해 지배받게 되므로, RE-TM계 박막을 대상으로 열자기 기록과정에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔으며 이에 대한 이론적 이해도 최근 상당한 진전을 보이고 있다.³⁻⁵⁾ 열자기 기록과정에 대한 이론적 접근방법의 가장 기본적인 것은 기록 도중의 박막내 온도분포 변화의 해석이다.

RE-TM계 박막의 열자기 기록기구의 규명

이 완전하지 않은 현재에 있어서 bit크기의 예측에 박막온도분포가 중심이 되는데,⁶⁾ 이 방법에 따르면, bit는 열자기 기록 중에 특정한 임계온도(T_{crit})이상으로 가열되었던 곳이 냉각 뒤에 역자구를 형성함으로써 만들어 진다고 가정하여 그 크기를 T_{crit} 이상의 온도로 가열된 곳으로 정의한다. 본 논문은 박막내 온도분포가 실제로 기록된 bit크기와 어떠한 관계에 있는지 알아보고 전술한 bit크기 예측방법의 적용한계를 알아보는 것을 그 목적으로 한다.

2. 실험방법

2-1. 박막 제작 및 특성분석

본 논문에서 실험 대상으로 선정한 재료는 열자기 특성이 잘 알려진 TbFe계이다.^{3,5)} 2.5 cm \times 7.5cm \times 1.0 mmt 크기의 세척된 유리기판 위에 Fe타겟과 Tb chip으로 이루어진 복합타겟 dc마그네트론 스퍼터링 방법으로 박막을 입혔다. 유도결합 플라즈마분석(Inductively Coupled Plasma Spectroscopy)에 의한 박막 조성은 Tb₂₈Fe₇₂였으며, DEKTAK II에 의한 두께 측정치는 약 1000 Å 이었다. 보자력과 포화

자화의 온도의존성(Hc(T), Ms(T))은 각각 Kerr이력곡선 측정장치와 진동시료자력계(Vibrating Sample Magnetometer)를 이용하여 측정하였다.

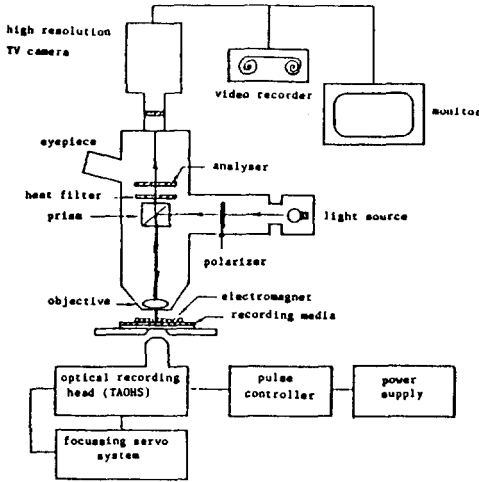


그림 1. 레이저 기록 및 bit관찰장치 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of laser writing and bit observation equipment.

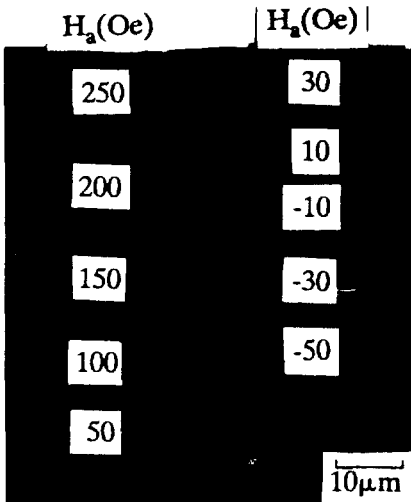


그림 2. Tb₂₈Fe₇₂박막에서의 외부자장변화에 따른 기록 bit모양의 변화
Fig. 2. Variation of bit size and shape in Tb₂₈Fe₇₂ film under various applied field.

2-2. 열자기 기록시험

제작한 Tb₂₈Fe₇₂박막에 대한 bit기록 실험은 그림 1과 같은 열자기 기록실험장치를 이용하였다. 이 장치는 집속된 레이저 빔으로 자성 박막을 가열하여 bit를 기록 또는 소거할 수 있는 레이저 기록장치와 극(polar)Kerr효과에 의해 자구를 관찰할 수 있는 편광현미경과 TV카메라 및 모니터로 이루어진 자구관찰부로 대별된다. 이 장치를 이용하여 Tb₂₈Fe₇₂박막에 레이저광 강도 8mW, 펄스시간 13μsec의 레이저 조사조건하에서 외부자계를 +250Oe~-500e까지 바꾸어 가면서 기록한 bit의 모양을 그림 2에 나타내었다.

Tb₂₈Fe₇₂박막에 대해 5mW, 7mW 및 9mW의 세종류 레이저 power와 각 power 별로 300ms~4μs사이의 여러 종류의 펄스로 열자기 기록하여 bit를 만들어 관찰하였다. 이때 외부자계 크기는 그림2에서 보는 바와 같이 원형의 bit를 만들 수 있는 조건인 150Oe로 고정하여 기록하였다.

3. 온도분포 계산

열자기 기록에서 레이저 빔에 의한 가열

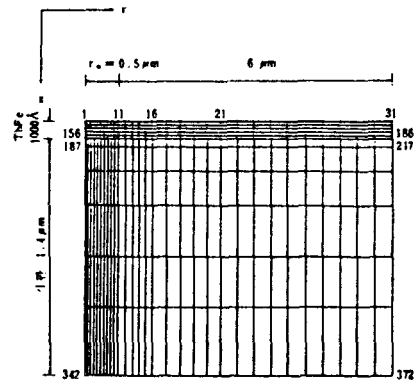


그림 3. TbFe단층막 구조시편에 대한 유한요소분해
Fig.3. Mesh generation for the finite element analysis for TbFe single layer film

표 1. 열전달 해석에 이용한 상수들

Table 1. Optical and thermal constants used in heat transfer analysis.

재료	상수	밀도 (g/cm ³)	비열 (J/cm ³ ·K)	열전도도 (W/cm·K)	반사율	광흡수계수
glass		2.32	1.81	0.0109	0.04	0
TbFe		9.73	2.75	0.4	0.5	$3 \times 10^{-7} \text{m}^{-1}$
SiO ₂		2.22	1.554	0.0138	0.04	0

및 냉각에 따른 온도분포 변화는 수 μ s, 수 μ m 이하의 순간적, 국부적으로 일어난다. 이러한 변화는 직접 측정하는 것이 사실상 어려우므로 열전달해석 방법을 이용하여 계산하여 알아보는 것이 보통이다. 정적(static)열자기 기록의 온도분포는 축대칭이므로, 반경방향과 두께 방향의 2방향에 관한 2차원 순간 선형 열전달 해석(2-dimensional transient linear heat transfer analysis)에 의해 온도분포를 구할 수 있다. Gaussian광강도 분포를 갖는 레이저 빔이 박막에 조사되어 박막을 가열할 때 열전달 과정에 대한 방정식의 결정 및 전개과정은 저자들에게 의한 기 발표논문에서 나타나 있으므로 본 논문에서는 생략한다.⁷⁾ 본 연구에서는 온도분포를 계산하는데 유한요소법을 이용한 열전달해석 프로그램인 ADINAT⁸⁾를 사용하였다. 실험에 이용한 박막과 같은 기하학적 조건을 갖는 시편에 대해 그림 3과 같이 330개의 요소를 나누고 372개 nodal point로서 해석구간을 정의하였다. 레이저 조사에 의한 열유입은 5개 층으로 나눈 1000Å 두께의 TbFe박막의 각층마다 광흡수계수를 고려하여 분배하였다. 계산의 시간간격은 레이저 가열시작후와 조사종료 직후는 10ns간격으로, 나머지 시간 간격은 100ns로 하였다. 표 1에 본 계산에 이용한 재료상수를 실었다.

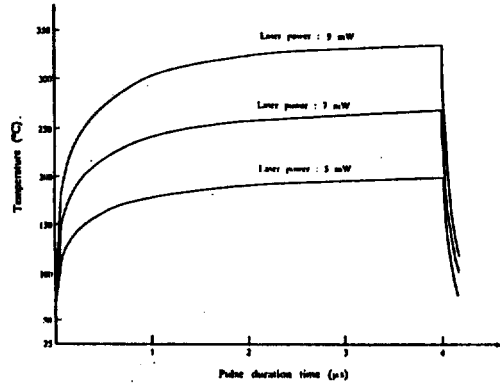


그림 4. 여러 레이저 power에 대한 박막면 beam 중심위치의 온도의 시간에 따른 변화.

fig. 4. Changes of temperatures at the fo surface in beam center during pulse duration at various laser power.

그림 4는 펄스시간 4 μ s의 레이저의 power가 각각 5mw, 7mw 및 9mw일때 박막내 최고온도(Tpeak) 즉, 레이저 빔 중심위치에서의 박막온도의 레이저 가열시간에 따른 변화를 나타낸다. 가열/냉각 특성은 레이저 power에 관계없이 가열초기($t < 100\text{ns}$)에 급속가열($5 \sim 8 \times 10^8 \text{°C/S}$) 과 레이저 조사종료($t = 4\mu\text{s}$) 직후의 급속냉각($\sim 5 \times 10^8 \text{°C/s}$)을 나타내며 가열후 80ns 이상이면 모든 경우에 대해 TbFe 박막의 Curie온도인 130°C이상으로 온도가 상승함을 알 수 있다.

또, 펄스시간이 0~300ns까지는 온도증가율이 $\sim 10^8 \text{°C/s}$, 300ns~1 μ s사이는 $\sim 10^7 \text{°C/s}$ 이며 1 μ s~4 μ s사이에서는 $\sim 10^6 \text{°C/s}$ 로서 시간 경과에 따라 온도 증가 속도가 10배가량씩 감소함을 보여준다. 그림 4의 Tpeak값의 변화로부터 레이저 power가 5~9mW범위에서 펄스시간이 300ns이상이면 모든 경우에 대해 Curie점 기록방식에 의해 열자기 기록이 이루어짐을 확인할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

열자기 기록시 자화반전 기구에 대한 이해가 부족하여 현재까지 열자기 기록 bit의 크기를 예측하고자 한 많은 노력들이 그다지 성공적이지 못했지만, bit크기에 가장 큰 영향을 주는 것은 레이저 가열 및 냉각되는 박막의 온도분포 변화라는 것에는 이의가 없다.

박막 온도분포 변화를 알때 bit 크기를 예측하는 가장 간단한 근사법은 Honda 등이 논한 바 있는 식(1)이다.⁹⁾

$$4\pi Ms(T_0) + H_b = H_c(T_0) \quad (1)$$

Hb : 외부자계

T₀ : bit경계를 이루는 온도

식 (1)의 의미는 그림 5의 (a)와 같이 온도 증가에 따라 감소하는 박막 보자력이 포화자화 Ms를 갖는 박막의 반자장인 4πMs와 외부자계 Hb와의 합과 같거나 작게 되면 bit가 만들어 진다고 가정하여 이 경계가 되는 온도 T₀에서 bit경계를 이루게 된다는 것이다. 이 T₀를 bit형성의 임계온도(Tcrit)라고 하고, 레이저 가열시 조사종료 직전의 박막내 최대온도 분포를 그림 5와 같이 생각하면 이 등온선들 중 Tcrit에 해당하는 등온선 직경이 bit 직경이라고 간주하게 된다. (그림 6(b)). 레이저 조사시간 즉 pulse시간이 길어지면 그림 5의 박막면 중심에 온도에 해당하는 새 등온선들의 출현과 아울러 기존의 등온선들은 그 직경이 늘어나게 된다. Tb₂₈Fe₇₂ 박막의 경우 Tcrit은 그림 6(a)와 같이 116°C가 되고 이 온도와 주위 다른 온도의 등온선 직경이 각 레이저 power별로 pulse조사시간 증가에 따라 늘어나는 것을 열전달 해석에 의해 구한 온도분포 변화자료로부터 도표화하여 그림 7(a~c)에 나타내었다. 이와 아울러 레이저 power별로 pulse시간을 달리하며 열자기 기록

한 bit들로부터 직경을 측정한 결과를 그림 7에 함께 나타내어 온도분포 계산 결과에서

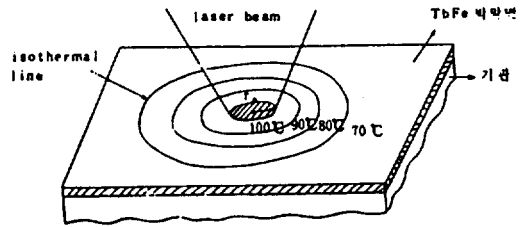


그림 5. laser조사에 의해 TbFe박막표면에 형성되는 등온선들의 모양

Fig. 5. Isothermal lines at the TbFe film surface by laser irradiation.

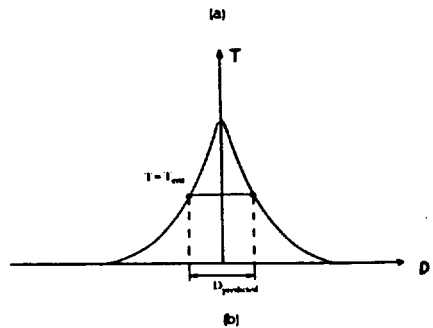
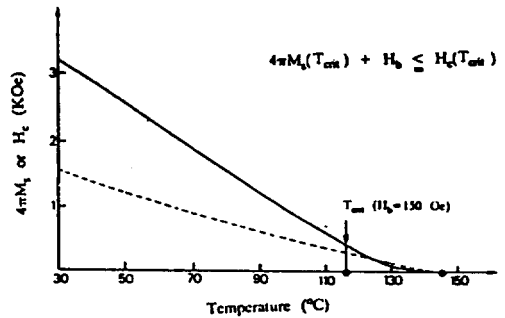


그림 6. (a) Tb₂₈Fe₇₂ 박막의 4πMs 및 Hc의 온도에 따른 변화로부터 임계온도(Tcrit)의 결정 (b) 예측한 bit크기와 Tcrit과의 관계

Fig. 6. (a) Determination of critical temperature (Tcrit.) from 4πMs and Hc vs. temperature curves of Tb₂₈Fe₇₂ film.

(b) Relationship between predicted bit size (Dpred.) and Tcrit.

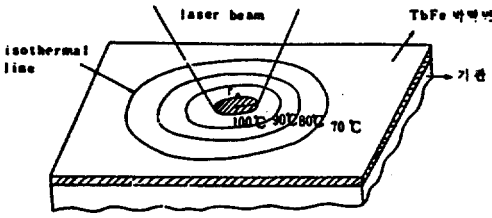


그림 7. laser조사에 의해 TbFe박막표면에 형성되는 등온선들의 모양

Fig. 7. Isothermal lines at the TbFe film surface by laser irradiation.

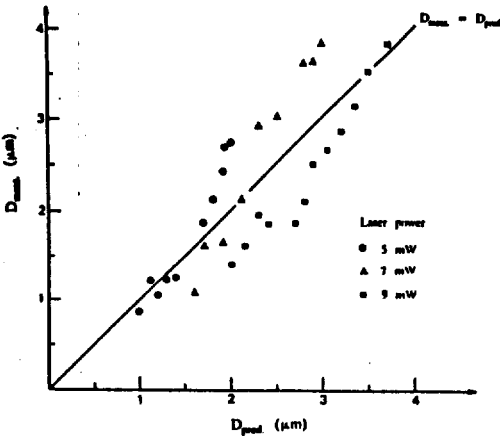


그림 8. 예측한 bit크기(Dpred.)와 실측한 bit크기(Dmeas.)의 비교

Fig. 8. Comparison of predicted bit size(Dpred.) and measured one(Dmeas.)

구한 여러 등온선들의 직경 변화와 비교하였다. 그림 7(a)에서 pulse시간이 1 μ s미만인 구간을 보면 측정된 bit크기의 pulse시간 의존성이 Tcrit(116°C) 직경변화와 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 pulse시간이 길어지면 측정된 bit크기는 Tcrit의 직경보다 커져 낮은 온도의 등온선 직경크기에 가까워진다. 그림 7(b), (c)에서 700ns이하의 pulse시간으로 기록된 bit크기는 Tcrit의 등온선 직경보다 더 작아져 기

록 power가 7mW시 130°C, 9mW시는 150°C의 등온선 직경에 가깝게 되나, pulse시간이 길어진 경우는 그림 7(a)의 경향과 마찬가지로 낮은 온도의 등온선 직경 크기에 가까워진다.

이를 그림8과 같이, 측정한 bit크기(Dmeas.)vs. 계산으로 예측한 bit크기(Dpred.)의 도표로 나타내면 최대오차 약 25%의 정확도로 측정치와 예측치가 일치하는 것으로 보인다. 그러나, 그림 8에서 Dpred.값이 2 μ m인 주위, 즉 Tcrit의 직경이 2 μ m부근인 경우를 보면 laser power/pulse의 조사조건이 5mW/2 μ s, 5mW/3 μ s, 5mW/4 μ s와 7mW/700ns 7mW/800ns 그리고 9mW/300ns인 경우의 온도분포가 이에 해당하는데 각각의 bit크기를 보면 1.4 μ m~2.8 μ m의 범위를 나타낸다. 이러한 차이는 다음의 두가지 관점에서 분석된다. 첫째로, 박막 온도분포 해석상의 문제를 생각할 수 있다. 열전달 해석에 이용한 재료상수들 중 박막밀도는 bulk의 값보다 작은 것이 일반적이고 그 값도 sputtering조건에 따라 달라진다⁹⁾. TbFe와 같은 비정질 박막의 비열은 bulk와 큰 차이가 없고, 비열의 약간의 오차는 온도계산상에 큰 오차요인이 되지 않는다. 그러나 박막의 열전도도 상수는 bulk의 값과 크게 달라서 박막에 대한 측정치를 이용해야만 한다. 본 계산에 이용한 TbFe 박막의 열전도도 상수는 저자들이 아는 한 측정치의 보고자료가 없으므로 비정질 TbFeCo박막에 대한 측정치¹⁰⁾로부터 인용하였다. 이러한 열전달 해석상의 오차요인때문에 앞서 구한 그림 7의 계산된 온도분포 해석결과를 박막의 실제 온도분포라고 생각하기 어렵다. 그러나, 열전달 해석에 이용하는 재료상수 값을 최대 50%까지 변화시켜가며 그림

7과 같은 형태의 도표를 만들어도 기록 bit경 vs. pulse시간의 관계와 일치하는 T_{crit} vs. pulse시간의 도표가 만들어지지 않는다. 그러므로, 그림8의 D_{pred} 와 D_{meas} 간의 차이를 해석하기 위해서는 또 다른 관점에서 생각할 필요가 있다.

D_{pred} 와 D_{meas} 간의 차이가 보이는 특징은 레이저 pulse시간이 길어지면서 기록 bit경계가 되는 온도가 식(1)에서 정의한 임계온도보다 낮아지려는 경향을 보인다는 것과, 같은 pulse시간으로 레이저를 조사했을 때 레이저 power가 클수록 실측 bit 크기에 해당하는 직경을 보이는 등온선의 온도가 높아진다는 것이다.

이 특징의 공통점을 더 자세히 파악하기 위해 pulse시간이 300 ns와 4 μ s 일때 박막면의 온도분포를 레이저 power별로 알아보았다(그림 9 (a), (b)). 즉, 레이저 power가 작다는 것과 pulse조사시간이 길어진다는 것은 모두 $T = T_{crit}$ 주위의 박막면 온도구배가 상대적으로 완만해지는 경우에 해당한다.

또, 열자기 기록 bit형성이 완전히 이루어지는 것은 레이저 조사종료 후의 냉각과정도 중이므로 그림 9와 같은 레이저조사 종료 직전의 온도분포외에 냉각시각 직후의 시간경과에 따르는 온도분포 변화도 bit형성에 영향을 미칠 것이다. 그러므로, 열자기 기록시 온도구배가 급한 경우보다는 구배가 완만할 때 냉각과정이 상대적으로 서서히 일어나므로, 자화반전 또는 자벽이동이 용이하여 bit경계가 되는 온도가 낮아지게 될 것임을 추측할 수 있다.

결론적으로, 열자기 기록의 정량적 해석은 온도분포 해석만으로는 부족하여 열자기 기록시 자화반전 및 자벽이동 과정에 대한 이

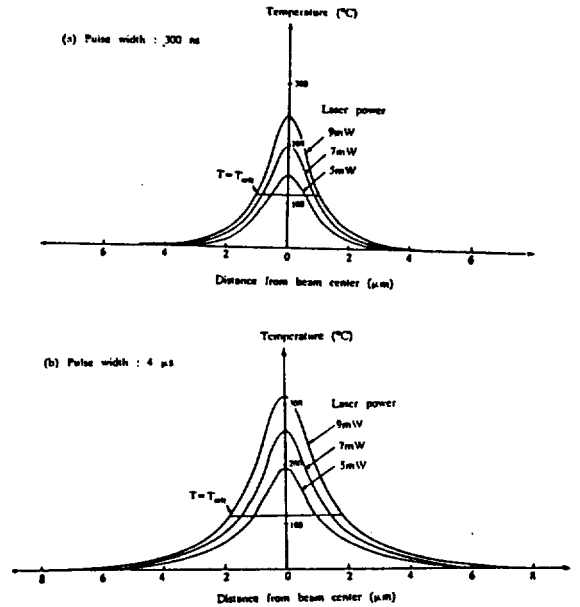


그림 9. 레이저 pulse조사시간이 300ns(a) 및 4 μ s (b)일때 레이저 power별 박막온도 분포계산 결과(시료: 유리기판 위의 1000Å 두께의 TbFe박막)

Fig. 9. Calculated temperature profiles on film surface developed by laser irradiations of 300ns(a) and 4 μ s(b) pulse width at various laser power levels. (Material: 1000Å thick TbFe film on glass substrate)

해가 전제되어야 한다.

5. 결론

열자기 기록시 만들어지는 bit크기는 일차적으로 레이저 가열시의 온도분포에 의해 지배되는데, 특정온도가 bit경계온도로서 정해지지 않으며 온도구배가 완만할수록, bit경계를 이루는 온도가 낮아져 bit크기가 커지는 것으로 나타났다. bit크기에 대한 정확한 예측을 위해서는 온도구배하의 자벽이동기구와 반자강의 역할에 대한 규명이 필요하다.