

레이저 스크라이빙에 있어서 레이저의 펄스폭에 따른 규소강판의 코어손실 개선 연구

안성준*

선문대학교 자연과학대학 신소재과학과, 충남 아산시 탕정면 갈산리 100, 336-708

박철근 · 안성준

선문대학교 공과대학 정보통신공학부, 충남 아산시 탕정면 갈산리 100, 336-708

(2005년 9월 7일 받음, 2005년 11월 18일 최종수정본 받음)

3%의 규소강판에 대한 코어손실 특성은 규소강판에 포함된 실리콘 함유량, 불순물의 농도, 투자율, 자구의 구조 등에 의존한다. 자구 미세화는 고 투자율을 갖는 규소강판의 코어손실을 감소시키는 좋은 방법이다. 본 연구에서는 펄스형 Nd:YAG 레이저를 규소강판에 조사함으로써 규소강판의 자구를 미세화 하여 코어손실을 최소화 할 수 있는 최적조건을 분석하였다. 조사된 레이저 빔의 spot 크기는 100 μm , 펄스 당 에너지는 10~35 mJ, 스크라이빙 줄 간격은 5 mm로 결정하였으며 펄스폭이 30 ns인 Nd:YAG 레이저를 사용하여 규소강판의 코어손실을 최대 17%까지 개선하였다.

주제어 : 레이저 스크라이빙, 펄스형 Nd:YAG 레이저, 펄스폭 의존성, 코어손실, 자구 미세화, tensile stress

I. 서 론

레이저를 이용하여 물질의 미세가공에 대한 연구가 시작된 이후 많은 연구자들이 반도체 소자의 재료인 실리콘과 고온, 고강도용 재료 중의 하나인 세라믹 가공, 그리고 자성물질이나 자성박막에 대한 열처리를 위하여 레이저를 이용하고 있다. 그 중에서도 규소강판에 대한 레이저 스크라이빙은 규소강판의 전기적 특성을 개선하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는 분야 중의 하나이다[1-7].

레이저를 이용하여 소재를 가공할 경우 일반적으로 사용되고 있는 기계적인 방법에 비해서 공정의 자동화가 용이하고, 공구의 소모가 없으며, 가공 외력이 전달되지 않기 때문에 간단하고 깨지기 쉬운 물질을 쉽게 가공할 수 있는 장점이 있다. 특히 규소강판, 실리콘, 세라믹 등과 같이 단단하고 견고한 물질을 가공할 때 금이 가는 문제가 발생하지 않으며, 가공물질과 직접 접촉하지 않으므로 가공과정에서 일어나는 오염문제를 피할 수 있다. 또 펄스형 레이저를 사용할 경우 열원(heat source)의 펄스폭이 짧아서 열에 민감한 요소를 보호할 수 있으며 가공할 때 에너지가 전달되는 시간과 영역이 매우 작기 때문에 가공물질의 뒤뜰림이나 수축을 방지할 수 있는 등 많은 장점을 가지고 있다[8-10].

일반적으로 규소강판과 같은 자성체가 포화에 가까이 자화될 때 자력이 pinning을 극복해야 하는데, 이 경우 자기손실

(core loss)이 생긴다. 자기손실의 거시적인 해석은 자기이력곡선으로부터 출발하며 자기이력곡선상을 따라 자화, 탈자되고 이 과정에서 매 주기 단위 체적 당 소요되는 에너지는 자기이력곡선 내부의 면적으로 표시되며, 이를 자기이력손실이라고 한다. 이러한 자기손실은 옴스타인 시료에 의해 측정되며, 전체 자기손실은 이력손실(hysteresis loss), 와전류손실(eddy-current loss) 및 이상손실(anomalous loss)로 나누어진다. 이 중에서 이력손실과 와전류 손실은 재료 특성에 의존하며, 이상손실은 제 2차 조건인 자구 미세화에 의해 향상될 수 있다고 잘 알려져 있다.

레이저 스크라이빙에 의한 자구 미세화는 물리적으로 시료에 stress를 가하는 방법보다 가공방법이 용이하고 재현성이 높을 뿐 아니라 스크라이빙 패턴의 형태나 레이저 빔의 출력 조절이 비교적 간단하여 양산 라인에 적용할 경우 생산 공정을 획기적으로 향상시킬 수 있을 것이다. 본 실험에서는 3% 규소강판의 자구 미세화를 통한 자기손실을 개선하기 위하여 금속 매질에서의 에너지 흡수가 우수한 펄스형 Nd:YAG 레이저(Fig. 1 참조)를 이용하였으며 스크라이빙 레이저의 펄스폭에 따른 규소강판의 코어손실 개선의 의존성을 조사하였다.

II. 실험 및 실험방법

레이저 스크라이빙은 레이저의 에너지(출력)를 가공매질의 표면에 집중하여 레이저 빔이 조사된 부위가 용융되거나 기화됨으로써 흠이 파져 가공매질의 표면에 stress를 가해준다.

*Tel: (041) 530-2261, E-mail: sjan@sunmoon.ac.kr

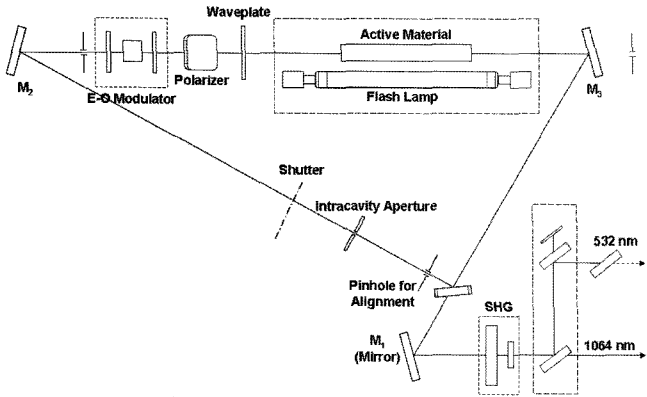


Fig. 1. Optical diagram of LQ 129 pulsed Nd : YAG laser system.

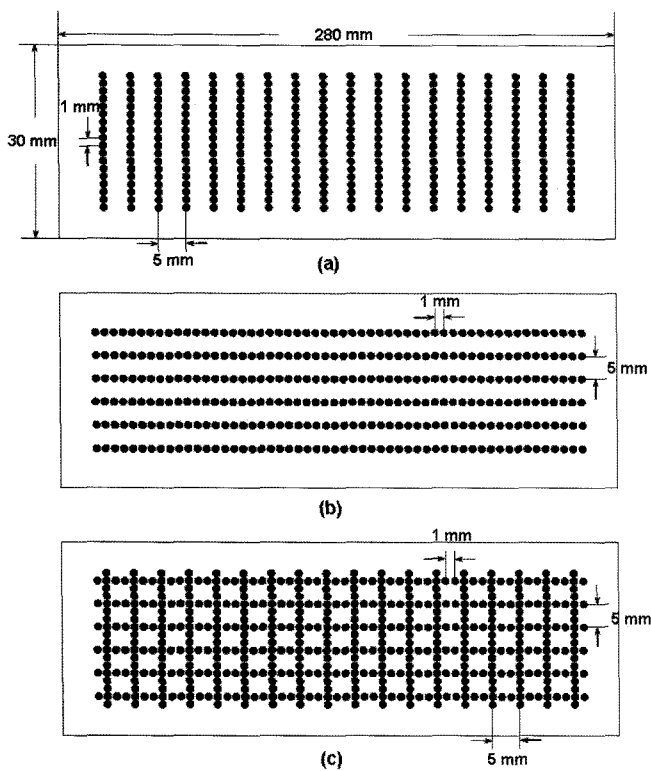
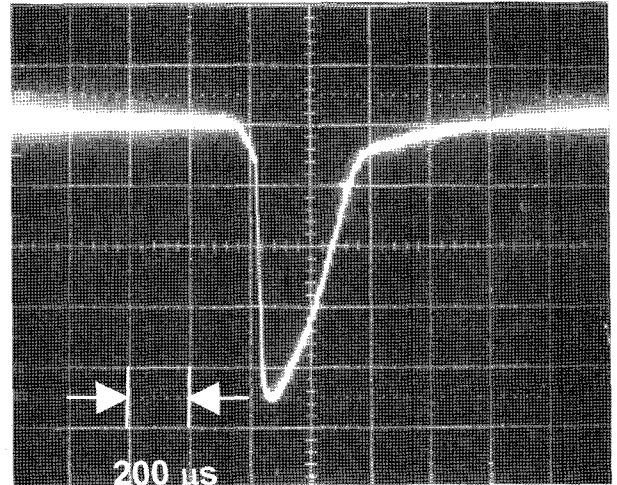


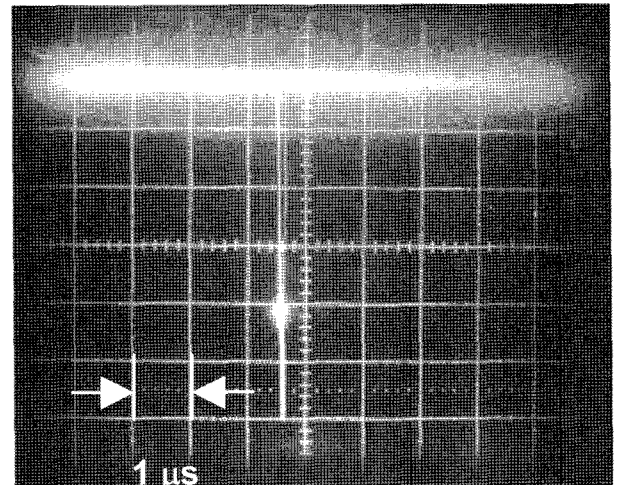
Fig. 2. The pattern of laser scribing in the longitudinal direction (a), transversal direction (b), and mixed pattern (c).

용융현상은 에너지가 클수록 잘 일어나지만 기화현상은 레이저 빔의 출력에 더 우세하게 의존한다. 본 실험에 사용한 레이저는 Solar Laser Systems 사의 Model LQ-129인 펄스형 Nd : YAG 레이저로서 펄스 반복율이 1~10 Hz, 최대 ~160 mJ/pulse의 에너지를 방출하며 E-O 변조기를 공진기에 삽입하여 능동형 Q-switching을 하는 레이저이다.

규소강판(3% SiFe : 280×30 mm²)에 초점거리 10 cm인 볼록렌즈로 레이저 빔을 집중 시킨 다음 X-Y 테이블을 0.1 cm/s의 속도로 움직이면서 1 Hz의 반복율로 레이저를 조사하



(a)



(b)

Fig. 3. The pulse width by the pulsed and Q-switched Nd:YAG laser; (a) 220 μs : pulsed mode, (b) 30 ns : Q-switched mode.

여 Fig. 2와 같은 패턴의 시료를 제작하였다. Fig. 2(a)는 규소강판의 rolling 방향과 수직인 방향(longitudinal direction)으로, (b)는 rolling 방향(transversal direction)으로, (c)는 rolling 방향에 수직인 방향과 rolling 방향을 혼합하여 스크라이빙 stress를 인가한 경우이다.

레이저의 펄스폭은 Q-switching을 하지 않았을 경우(일반적인 펄스 mode) 220 μs이고 Q-switching(Q-switching mode)을 하였을 경우 ~30 ns이다(Fig. 3 참조). 펄스 당 에너지가 10 mJ/pulse이 되도록 레이저를 발진 시킨다면, 일반적인 펄스 mode의 경우 펄스폭이 220 μs이기 때문에 침투 출력은 ~45 W이고 Q-switching mode로 동작시켰을 경우는 펄스폭이 30 ns이기 때문에 침투 출력이 ~0.3 MW가 되어 펄스 mode로 동작시켰을 때 보다 6,700배나 크게 된다.

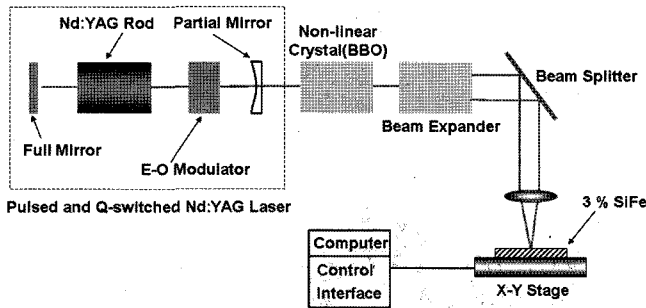


Fig. 4. Experimental set-up for laser scribing.

따라서 본 실험에서는 평균 출력을 비슷하게 한 다음 Fig. 4와 같이 레이저를 정렬하여 펄스폭 및 펄스 당 에너지에 따른 코어손실의 변화를 관찰하였다. 또 레이저 빔의 강도 또한 매질의 표면에 stress를 주는 주요한 인자 중의 하나이므로 레이저 빔을 집속 시키는 집속렌즈를 동일한 것으로 사용하여 레이저 빔의 크기를 모든 출력에 대하여 거의 동일하게 (~100 μm) 정렬하였다.

III. 실험결과 및 토의

자성체가 갖는 총 손실의 60~70%를 차지하는 코어손실은 이력손실과 와전류손실로 대별된다. 이러한 코어손실은 물질의 특성(실리콘 함유량, 박막의 두께, 불순물의 농도, 비저항, 투자율, 자구의 구조 등)에 따라 크게 의존한다[11, 12]. 일반적으로 코어손실을 개선하는 방법에는 크게 두 가지로 분류가 되는데, 하나는 방향성 규소강판에 MgO 박막을 적층하여 압연방향(longitudinal direction)으로 적당한 장력을 부여함으로써 코어손실을 개선하는 방법이고 또 하나는 규소강판의 표면에 압연방향과 직각방향(transverse direction)으로 stress를 가하여 자구를 제어함으로써 코어손실을 개선하는 방법이다 [13, 14].

본 연구에서는 금속 매질에서의 에너지 흡수가 우수한 펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 3% 규소강판에 10~35 mJ/pulse의 레이저 빔을 조사함으로써 레이저 빔의 펄스폭, 출력 및 레이저 스크라이빙 패턴에 따르는 규소강판의 코어손실의 의존성을 관찰하였다. 레이저 스크라이빙 pattern은 규소강판의 코어손실 개선에 있어서 중요한 인자이지만 Fig. 2와 같이 여러 가지 패턴으로 실험한 결과 (a)의 형태(최적화된 줄 간격 : 5 mm, dot 간격 : 1 mm)가 가장 적합한 패턴임을 알았다.

레이저 빔의 펄스폭이 220 μs(일반적인 기본 펄스 mode)와 30 ns(Q-switching mode)인 레이저 펄스에 대하여 펄스 당 에너지를 동일하게 하여 시료에 Fig. 2(a)의 패턴으로 레이저 빔을 조사할 경우, 펄스폭이 짧은 레이저 빔(30 ns)이 펄스폭

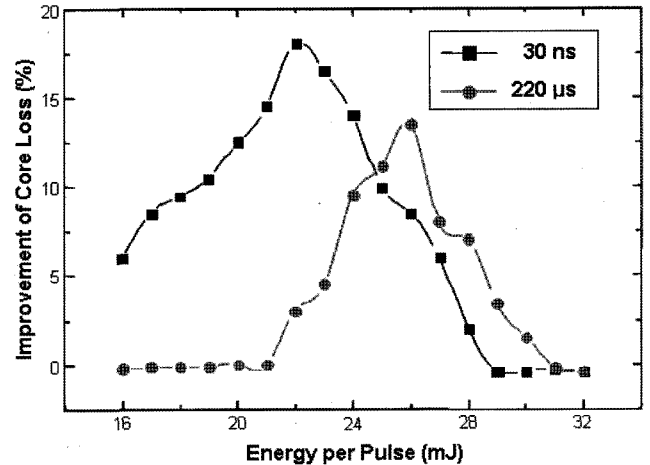


Fig. 5. Improvement of core loss according to pulse width (30 ns and 220 μs) of the Nd:YAG laser.

이 긴 레이저 빔(220 μs)보다 침투 출력이 훨씬 크기 때문에 낮은 에너지로써 시료의 코어손실을 감소시킬 수 있다. Fig. 2(b)와 (c)의 패턴으로 시료에 레이저 빔을 조사할 경우 최대 8.8%와 4.2%의 코어손실이 개선되었으나 Fig. 2(a)의 패턴으로 레이저 빔을 조사한 경우보다 개선율이 떨어졌다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 펄스폭이 짧은 레이저 펄스로 시료를 조사할 경우 21~24 mJ/pulse의 넓은 에너지 영역에서 15~17%의 코어손실을 개선시킬 수 있었다. 그러나 펄스폭이 긴 레이저 빔을 조사하였을 때 26 mJ/pulse의 특정한 에너지 영역에서만 최대 13%의 코어손실이 개선되었다.

이 결과로부터 Q-switching된 레이저 펄스는 펄스폭이 일반적인 펄스보다 훨씬 짧기 때문에 레이저 펄스의 침투 출력이 높게 되며 낮은 에너지 영역에서도 시료의 표면에 상대적으로 높은 tensile stress를 유발시킴으로써 자구를 미세화[11]하여 시료의 코어손실을 감소시키는 것으로 추론할 수 있다. 그리고 시료에 조사되는 레이저 빔의 펄스폭이 짧은 Q-switching된 레이저 펄스의 경우, 코어손실을 최대한으로 감소시킬 수 있는 에너지 영역이 넓기 때문에 최적화된 레이저 스크라이빙 조건을 tuning 하기가 펄스폭이 긴 펄스 mode의 경우보다 상대적으로 훨씬 쉽다. 또, 펄스폭이 긴 레이저 빔을 조사하게 되면 펄스폭이 짧은 레이저 빔을 조사하였을 때보다 펄스 당 에너지가 크기 때문에 용융우세공정(melting dominant process)[15]이 시료의 표면에서 일어나며 레이저 펄스의 에너지가 확산되어 시료의 표면층이 열처리되는 효과가 동반되지만 레이저 스크라이빙으로 인한 표면층의 손상이 크게 된다. 이것은 펄스폭이 긴 레이저 빔을 조사할 경우 레이저 빔이 조사된 시료의 표면층이 레이저 빔의 에너지에 의해 용융되기 때문이며 펄스폭이 짧은 레이저 빔을 조사 경우에는 multi-photon 흡수에 의해서 레이저 빔이 조사된 시료

의 표면층이 기화되는 현상이 일어나기 때문이다[16].

따라서 펄스폭이 짧고 첨두 출력이 큰 레이저 펄스를 레이저 스크라이빙에 사용하는 것이 적은 에너지로 tensile stress를 효과적으로 유발하여 코어손실을 감소시킬 수 있을 뿐 아니라 시료의 표면에 damage도 현저히 줄일 수 있어서 훨씬 바람직할 것으로 생각된다.

IV. 결 론

펄스형 Nd:YAG 레이저를 이용하여 3% 규소강판의 지구를 미세화 시킴으로써 코어손실을 감소시켜 자기적 특성을 개선하였다. 지구 미세화는 레이저 스크라이빙에 의해 매질의 표면에 stress를 가함으로 일어나는데 이것은 조사되는 레이저 빔의 펄스폭, 파장, 에너지, 첨두 출력, 스크라이빙 패턴 등 여러 가지 요인에 대하여 달라지지만 본 연구에서는 조사되는 레이저 빔의 펄스폭과 에너지의 의존성에 대하여 관찰하였다.

실험에 사용된 레이저는 펄스폭이 220 μ s와 30 ns인 레이저 빔을 사용하였으며 펄스 당 에너지를 10~35 mJ/pulse의 영역에서 변화시키면서 시료에 조사하여 코어손실을 최대 17%까지 개선시켰다. 그리고 규소강판에 대한 레이저 스크라이빙에 있어서 펄스폭인 긴(220 μ s) 레이저 빔을 조사하는 것보다 펄스폭이 짧은(30 ns) Q-switching 된 레이저 펄스를 조사할 경우, 레이저 빔의 에너지 범위가 넓어져 레이저 스크라이빙을 위한 최적조건을 tuning 하기가 쉬울 뿐 아니라 규소강판의 표면에 coating된 MgO 피막의 손상도 최소화 할 수 있음을 알았다.

참고문헌

- [1] B. Weidenfeller and W. Rieheman, *J. Mag. Mag. Mater.*, **160**, 136 (1996).
- [2] D. Raybould, M. Meola, R. Bye, and S. K. Das, *Mater. Sci. Eng. A*, **241**, 191 (1998).
- [3] T. Kubota, M. Fujikura, and Y. Ushigami, *J. Mag. Mag. Mater.*, **215-216**, 69 (2000).
- [4] D. Ramin and W. Rieheman, *J. Mag. Mag. Mater.*, **203**, 298 (1999).
- [5] J. Li, Y. Gu, and Z. Guo, *J. Mater. Processing Tech.*, **74**, 292 (1998).
- [6] X. Zhu, *Appl. Sur. Sci.*, **167**, 230 (2000).
- [7] L. Li, *Optics and Lasers in Eng.*, **34**, 231 (2000).
- [8] H. Beyer, W. Ross, R. Rudolph, A. Michaelis, J. Uhlenbusch, and W. Viol, *J. Appl. Phys.*, **70**, 75 (1991).
- [9] V. Oliveira and R. Vilar, *J. Mater. Res.*, **12**, 3206 (1997).
- [10] S. M. Meter and V. P. Veiko, *Laser-Assisted Microtechnology*, Springer-Verlag, Berlin, Chapt. 3, Chapt. 6.
- [11] S. V. Ponnaluri, R. Cherukuri, and P. A. Molian, *J. Materials Processing Tech.*, **112**, 199 (2001).
- [12] S. Patri, R. Gurusamy, P. A. Molian, and M. Govindaraju, *J. Mater. Sci.*, **31**, 1693 (1996).
- [13] A. J. Moses, *IEE. Proc. Part A*, **137**, 233 (1990).
- [14] T. Luchi, S. Yamaguchi, T. Ichiyama, M. Nakamura, T. Ishimoto, and K. Kuroki, *J. Appl. Phys.*, **53**, 2410 (1982).
- [15] X. Liu, D. Du, and G. Mourou, *IEEE. J. Quant. Electron.*, **QE-33**, 1706 (1997).
- [16] S. Ahn, D. W. Kim, H. S. Kim, S. J. Ahn, and J. Cho, *Microelectron. Eng.*, **69**, 57 (2003).

Study on the Core Loss Improvement of SiFe Plate in Relation with Laser Pulse Width in the Laser Scribing

Seungjoon Ahn*

*Department of Physics & Advanced Materials Science, Sunmoon University,
100, Kalsan-ri, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chungnam 336-708, Korea*

Chul Geun Park and Seong Joon Ahn

*Division of Information and Communication Engineering, Sunmoon University,
100, Kalsan-ri, Tangjeong-myeon, Asan-si, Chungnam 336-708, Korea*

(Received 7 September 2005, in final form 18 November 2005)

The core loss of 3 % SiFe is strongly dependent on silicon content, impurities, permeability, and domain structure of the SiFe. Domain refining has been proved to be very good method for reduction of core loss in high permeability grain oriented SiFe, and laser scribing is well-known as an effective and industrially important method of domain refinement. In this work, magnetic domain refinement has been carried out by using a pulsed Nd : YAG laser, and the core losses have been measured and analyzed to find optimal parameters of the laser treatment. The laser beam was focused with a spot size of 100 μm and pulse energy of 10~35 mJ and the lines were scribed with a period of ~5 mm. The core loss was improved up to 17 % with 30 ns-Nd : YAG laser beam in 3 % SiFe.

Key words : laser scribing, pulsed Nd : YAG laser, pulse width dependence, core loss, magnetic domain refinement, tensile stress