

고 에너지를 이용한 충격파 발생과 응용

이현희* · 여재익**

Shock Compression of Metal using High Energy Laser and Innovative Applications

Hyun hee Lee* · Jai ick Yoh**

ABSTRACT

We have been setting up experiments on propagation of shock waves generated by the pulsed laser ablation. One side of a thin metal foil is subjected to laser ablation as a shock wave propagates through the foil. The shock wave, which penetrates through the foil is reflected by an acoustic impedance which causes the metal foil to high-strain rate deform. This short time physics is captured on an ICCD camera. The focus of our research is applying shock wave and deformation of the thin foil from the ablation to accelerating micro-particles to a very high speed.

초 록

본 연구의 목표는 고 에너지원이 고 출력 펄스 레이저를 이용하여 금속 표면에서 발생하는 충격파를 분석 하고 이를 다른 분야에 적용하는 것이다. 금속 표면 일정 단면에 펄스 레이저를 조사시키면 충격 파가 발생하며 이 충격파는 음향 임피던스에 의해 레이저가 조사된 반대 방향으로 극 초음속(4000m/s 이상)으로 매우 짧은 시간동안 진행하며 다른 표면에서도 고 에너지에 의해 충격파가 발생한다. 이와 함께 얇은 금속은 순간 탄성변형을 일으킨다. 짧은 시간에 발생하는 모든 현상은 ICCD카메라를 통해 확인 할 수 있다. 이 실험의 목적은 고 에너지에 의해 발생한 충격파를 이용하여 미립자를 매우 빠른 속도로 가속하는데 있다.

Key Words: Shock wave(충격파), Acoustic Impedance(음향 임피던스), Ablation(삭마현상), Inverse Bremsstrahlung(역 제동 복사)

1. 서 론

1970년 이래로 펄스 레이저를 이용한 금속 가열 연구가 여러 분야(micro-matching, chemical analysis, micro-particles fabrication, and thin film deposition)에서 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 extracorporeal lithotripsy과같이 의학 분야에 충격파 이용한 치료가 이루어지고 있다.

* 서울 대학교 기계항공우주공학과

** 서울 대학교 기계항공우주공학과

E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

최근에는 레이저 삭마 현상에 의해 발생한 충격파를 이용한 미립자 약물 전달에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 약물 침투에 관한 연구에서 안정성과 정확성이 가장 중요하다는에서 다른 방법(폭발)보다는 펄스 레이저에 의해 발생한 충격파를 이용한 연구가 가장 획기적이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 펄스 레이저를 이용한 충격파 발생과 충격파 발생과정에 일어나는 모든 현상에 대한 기초 연구를 선행하고 있다. 이후 펄스 레이저에 발생한 충격파를 이용하여 미립자를 가속하는 실험을 진행할 것이다. 실험과 동시에 이 모든 현상(충격파, 플라즈마, 미립자 가속)을 시뮬레이션 할 것이다.

2 이 론

2.1 역 제동 복사(Inverse Bremsstrahlung)

레이저가 한 점에 집중되기 시작하면 높은 열에 의해 기체 분자가 전자와 양이온 상태로 공존하는 플라즈마 상태로 붕괴(Breakdown)된다. 플라즈마 상태의 영역에 광양자, 즉 레이저 에너지가 조사되면 분포되어 있던 전자와 양이온, 그리고 중성자의 활발한 운동을 더욱 가속시키게 되며 서로 충돌을 일으키게 된다. 이 때 충돌에 의해 감속된 에너지만큼을 외부로 방출시키게 된다. 이것을 제동복사(Bremsstrahlung)라 하고 반대로 입자들의 가속에 의한 에너지의 흡수를 역 제동복사(Inverse Bremsstrahlung)라 한다. 엄밀히 말하자면 역 제동복사와 제동복사의 차이만큼의 에너지가 레이저 빔에 의해 변환되어 작동 유체로 흡수되는 에너지인 셈이다.

2.2 삭마(Ablation) 현상

삭마 현상은 기본적으로 레이저의 세기가 $10^9 W/cm^2$ 이상이고 펄스 시간을 $\sim ns$ 이하인 레이저를 시료의 한 점에 조사 시키면 발생한다. 시료 표면은 레이저 펄스가 가해지는 시간 동안 증발 온도를 넘어 서게 되며 표면의 증발에 의해 열이 방출되는 속도는 레이저 펄스 시간보다

는 오래 걸리므로 시료 표면 물질이 증발하기 전에 내부에서도 증발 온도에 도달하게 된다. 이로 인해 내부 물질의 온도와 압력은 임계점 이상으로 상승하여 시료는 순간 기화 된 후 전자와 양이온 상태로 공존하는 플라즈마 상태로 붕괴(Breakdown)된다. 이후 플라즈마의 전자와 양이온 및 중성원자는 에너지에 의해 더욱 가속되며 에너지를 흡수한다(역 제동복사). 결국 시료 표면에 발생한 플라즈마 기체 근처의 압력은 $10^5 Mpa$, 온도는 $10^4 k$ 이상으로 올라간다. 이 모든 과정은 가열 과정이 아니라 순간 가해지는 고 에너지로 인해 발생하였으므로 삭마된 부위와 주변에는 용융 현상이 생기지 않는다.

2.3 충격파 발생 원리

순간적으로 극소 부위에 고 에너지를($\sim 1GW$) 가하면 shock wave가 발생하게 된다. 그림[1].에 도출 되어 있는 것이 shock wave generation by laser ablation 과정이다

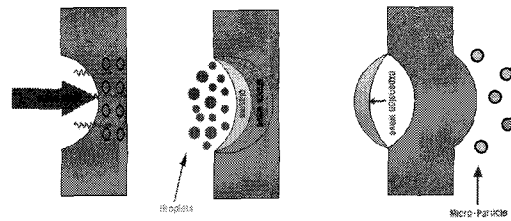


Fig 1. Schematic of shock wave generation by laser ablation

삭마 현상에 의해 생성된 플라즈마의 수명은 수십 μs 정도 되지만 레이저 펄스 유지 시간에 비하면 아주 긴 시간이다. 이 시간동안 레이저에 의해 처음 생성된 고온의 플라즈마는 주변의 공기와 상호작용을 일으켜 고온 고압의 기체가 주변으로 팽창해 나가면서 충격파를 발생시킨다. 이후 플라즈마의 에너지는 열전도 및 복사를 통해 주위의 기체와 충격파로 전달되며 플라즈마와 충격파는 분리 되어 플라즈마는 소멸된다. 충격파는 극초음속(4000m/s)로 속도로 전파 된다.

3. 실험 장비

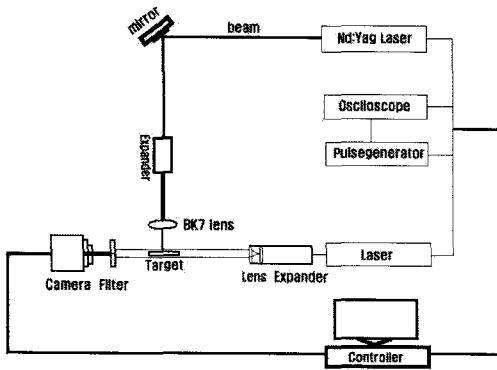


Fig 2. Schematic of experimental apparatus

고 에너지원의 펄스 레이저 빔(Nd:Yag powerlite Precision II Plus(3000mJ at 1064nm, 1500mJ at 532nm, 5~9ns pulse duration, repetition rate : 10Hz)이 laser line mirror(532nm @ 1064nm laser line mirror : diameter : 50mm: Reflectance : >99.5% @1064nm)를 지나 레이저 빔 확대경(LBE-3H, Wavelength of AR Coating : 400nm~700nm, expansion ratio 3×)에 의해 확대된다. 레이저 확대경을 통과한 균일한 레이저 빔은 BK7 plano convex lens(diameter 50mm, focal length 100mm)에 의해 금속 표면(thickness: 0.1mm , 0.05mm)의 한 점(2~3mm²)에 매우 짧은 시간 (~ns)동안 조사 한다. 이후 삭마 현상에 의해 레이저 빔이 조사된 반대 방향으로 음향 임피던스 (Acoustic Impedance)에 의해 충격파(shock wave)을 발생시킨다. 이와 함께 금속 내부의 고 에너지에 의해 레이저가 조사된 방향으로 stress wave를 발생시킨다. 이러한 현상을 촬영하기 위해 시간적 분해 능력이 좋은 Minilite (3ns pulse duration at 532nm)를 가시화를 위한 에너지원으로 사용하였다. 검사 레이저 빔은 레이저 빔 확대경(OPX-beam-X5: Expende lens : X5)을 통해 확대된다. 확대된 레이저 빔은 모음 렌즈(collimater: focal length: 25mm, Beam size : dia 3mm², dia. Lens: 12mm)를 통해 검사 체적들

통과한다. 카메라 앞에 줌 렌즈(OPX-7× precision zoom lens)를 설치하여 육안으로 실험 결과를 확인 할 수 있도록 이미지를 확대 시켰다.

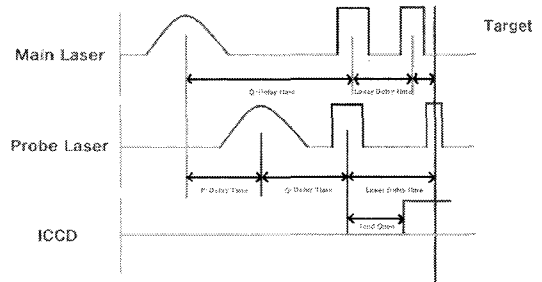
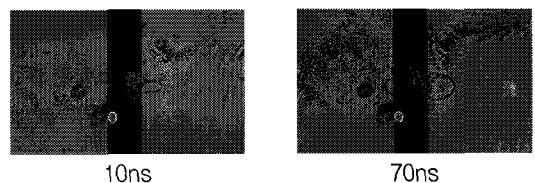


Fig 3. Schematic of visualization

특히 고 에너지원인 펄스 레이저와 검사 레이저 사이에 아주 짧은 시간(~ns)적 간격이 존재하므로 시간 분해 능력이 우수한 Pulse generator (565-8CG: RMS jitter 250ps ,500ps delay time)를 통해 시간적 동기화 및 신호를 제어 하였다.

4. 결과 및 분석

대기 중에서 레이저 삭마 현상에 의해 발생한 충격파는 Fig4에서 볼 수 있다. 삭마 현상후 10ns~50ns까지는 원기둥 모양으로 진행하며 70ns부터 충격파(S1)와 함께 반대편에도 충격파(S2)가 발생한다. 이 후(200ns~) 충격파는 반 원 모양으로 발달 되어 진행한다. 짧은 시간동안 발달한 두 개의 충격파는 4500ns 지점에서 하나의 충격파(S2)가 소멸 되고 이 후 5000ns에서 다른 충격파(S1)이 사라진다. 충격파의 반 원 지름과 압력, 온도, 속도는 Sedov's self-similar souldion (10) 를 통해 예측 할 수 있다.



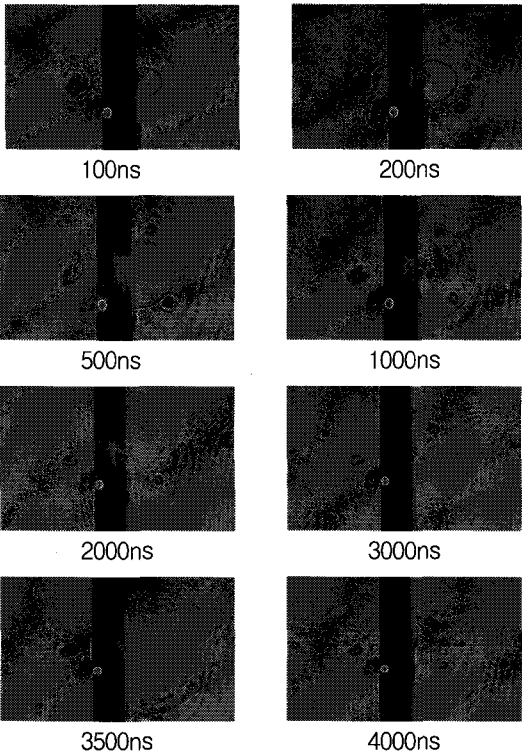


Fig 3. The sequence of images of the single pulse laser-induced thin film ablation (10mJ)

$$R(t) = \epsilon_s \left(\frac{2Et_{el}^2}{\rho_a} \right)^{0.2} \quad (1)$$

$$P_{sw} = 2 \left(\frac{2\epsilon_s}{5} \right) \left(\frac{E^2 \rho_a}{t_{el}^6} \right)^{0.2} \quad (2)$$

$$T_{sw} = T_0 \left(\frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right) \left(\frac{P_{sw}}{P_0} \right) \quad (3)$$

$$V_{sw} = \frac{dR}{dt} = \frac{2}{5} \epsilon_s^{0.4} \left(\frac{E}{\rho_a} \right)^{0.5} R^{-1.5} \quad (4)$$

- R : 충격파 반지름
 ϵ_s : 상수(γ 에 따라 값이 결정, $\gamma=1.4$ 인 경우 $\epsilon_s=1.03$)
 t_{el} : 경과시간(레이저 조사 후 시간)
E : 에너지
 P_{sw} : 충격파 압력
 T_{sw} : 충격파 온도
 V_{sw} : 충격파 속도

충격파의 압력과 온도는 레이저 조사 후 매우 짧은 순간(a few nanoseconds) 가장 높고 이후 충격파의 압력은 대기 압력으로 떨어진다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 기초과학지원사업 (KRF-2006-015-D00038)과 국방과학연구소 고에너지물특화센터(HM - 22)의 지원 하에 수행되었습니다. 가시화 장비구축에 도움을 주신 서울대학교 기계항공공학부 이준식교수님과 이병희 연구원에게 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. T.M. Klein, E.D. Wolf, R. Wu, and J.C. Sanford, Nature (London) 327,70(1987)
2. K.Takayama, "Application of shock wave research to medicine" Proc. 23rd Int. Symp. On shock waves, London, UK, July 1999, Vol. 1, pp.23-32.
3. Xian Hong Zeng, Xianglei Mao, sy-Bor Wen, Ralph Greif and Richard E Russo " Energy deposition and shock wave propagation during pulsed laser ablation in fused silica cavities" Journal of physics, 37(2004) 1132-1136.
4. V. Menezes and K. Takayama, "Laser ablation assisted microparticle acceleration for drug delivery" Applied Physics Letters, Vol. 87,163504, 2005.
5. K.R. Chen, J.N. Leboueuf, R.F. Wood, D.B.Geohegan, J.M. Donato, C.L. Liu and A.A. Puretzky, " accelerated Expansion of Laser-ablated Materials near a Solid Surface", Physical Review Letters, Vol.75, No.25, pp. 4706-(1995).
6. G. Jagadeesh and K. Takayama, " Novel applications of micro-shock waves in

- biological sciences", Journal of the Indian institute of Science, Vol.82, No.1, pp.49-57,2002.
7. J.J. Yoh, K.H. Kim, K.C.LEE, H. H. Lee, K.J. Park, " Innovative modeling of shock wave assisted biomedical treatment using energetic and inert elements", Pro. Asian Joint Conference on Propulsion and Power, Beijing, China, 2006.
 8. T. Y. Choi, C. P. Grigoropoulos, "Plasma and ablation dynamics in ultrafast laser processing of crystalline silicon", Journal of Applied Physics, Vol, 92, No, 9, 1 November 2002.
 9. Y. Zel'dovich, Y. Raizer, Physics of Shock Waves and High temperature Hydrodynamic Phenomena, Academic Press, New York, 1966.
 10. L.I. Sedov, Similarity and Dimension Methods in Mechanics, Academic, Press New York, 1959
 11. L. Landau, E. Lifshitz, Fluid Mechanics VI, Pergamon Press, Oxford, 1974.
 12. R.E.Russo, "Laser Ablation", Applied Spectroscopy, Vol, 49, No, 9, 1995.
 13. S.S. Harilal, C.V. Bindhu, M.S. Tillack, F.Najmabadi and A.C. Gaeris, " Internal Structure and Expansion Dynamics of Laser Ablation Plumes into Ambient Gases", September 28, 2002.
 14. Chunyi Liu, "A study of particle generation during laser ablation with applications", 2005