

고에너지펄스를 이용한 충격파 발생과 응용

이현희* · 최지혜* · 광민철* · 여재익*

Laser Supported Combustion Waves and Plasma Flows

Hyun-Hee Lee, Ji-Hae Choi, Min-Cheol Gwak, 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 is generated from a localized spot of high intensity energy source. The resulting reactive 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 generating reactive shock wave and high strain rate deforming of thin metal foil for accelerating micro-particles to a very high speed on the orders of several thousand meter per second. Some innovative applications of this device will be discussed.

Key Words : Laser-Supported-Blast-Wave(레이저충격파), Acoustic Impedance(음향 임피던스), Ablation(삭마현상), Laser Ignition(레이저점화), Drug Delivery(약물전달)

1. 서 론

1970년도 이래 펄스 레이저를 이용한 금속 가열 연구가 여러 분야(micro-machining, chemical analysis, micro-particles fabrication, and thin film deposition)에서 활발히 이루어지고 있다 [1-3]. 본 연구에서는 레이저 ablation에 의해 발생한 충격파를 이용하여 미립자 약물을 가속시키는 장치를 개발 중이다. 고에너지 펄스에너지를 Point Source Ignition으로 접근하여 연소 파(reacting wave)를 발생시키는 본 기술은 약물입자 가속(drug delivery)과 레이저점화 및 레이저 추진관련 연구의 초석을 다지는 계기가 되었다.

2. 이 론

2.1 Ablation 현상

삭마 현상은 기본적으로 레이저의 세기가 10^9 W/cm² 이상이고 펄스 시간을 ~ns이하인 레이저를 시료의 한 점에 조사 시키어 발생시킨다. 시료 표면은 레이저 펄스가 가해지는 시간 동안 증발 온도를 넘어서게 되며 표면의 증발에 의해 열이 방출되는 속도는 레이저 펄스 시간보다는 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 표면

* 서울대학교 기계항공공학부

† 연락처: jiyoh@snu.ac.kr

에 발생한 플라즈마기체 근처의 압력은 10^5 MPa, 온도는 10^4 Kelvin 이상으로 올라간다. 이 모든 과정은 가열 과정이 아니라 순간 가해지는 고 에너지로 인해 발생하였으므로 삭마된 부위와 주변에는 용융 현상이 생기지 않는다. 대신 Metal Expulsion 원리와 유사한 것으로 보인다.

2.3 충격파 발생 원리

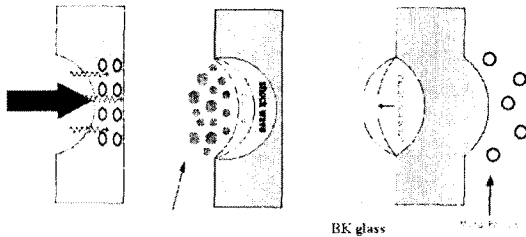


그림 1 Schematic of shock wave generation by laser ablation

순간적으로 극소 부위에 고 에너지를($\sim 1\text{GW}$) 가하면 shock wave가 발생하게 된다[4-8]. 그림 1에 도출 되어 있는 것은 Point-source의 삭마 반응에 의하여 생성되는 Combustion Wave 과정이다. 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 전파된다.

본 연구의 핵심은 주위진 에너지원 (레이저 플루엔스)에 의한 충격파는 연소 시 발생하는 Reactive Wave중 point-source explosion으로 접근하여 일반적인 Hydrodynamics를 기초로 해석을 시도 한다.

3. 실험 장비

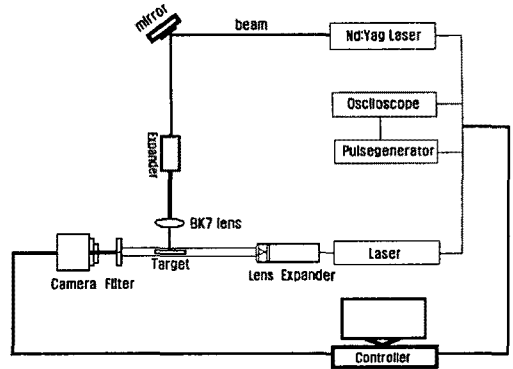


Fig 2. Schematic of experimental apparatus

고에너지펄스 레이저 빔(Nd:YAG Powerlite Precision II Plus(3000mJ at 1064nm , $5\sim 9\text{ns}$ 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: $400\text{nm}\sim 700\text{nm}$, expansion ratio $3\times$)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($2\sim 3\text{mm}^2$)에 매우 짧은 시간($\sim \text{ns}$)동안 조사 한다. 이후 삭마 현상에 의해 레이저 빔이 조사된 반대 방향으로 음향 임피던스(Acoustic Impedance)에 의해 blast wave를 발생시킨다. 이와 함께 금속 내부의 고에너지에 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 레이저빔은 확대경(OPX-beam-X5: Expander lens: X5)을 통해 확대된다. 확대된 레이저 빔은 모음 렌즈(collimator: focal length 25mm , beam size dia. 3mm , lens dia. 12mm)를 통해 검사 체적을 통과한다. 카메라 앞에 줌 렌

즈(OPX-7× precision zoom lens)를 설치하여 육안으로 실험결과를 확인 할 수 있도록 이미지를 확대 시켰다[9].

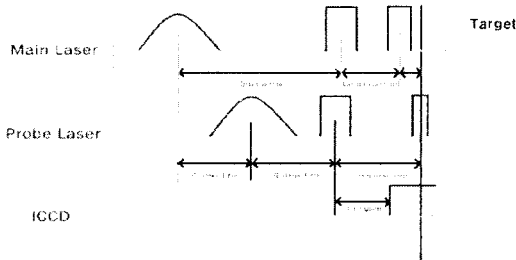


Fig 3. Schematic of visualization

고 에너지인 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 point-source blast wave는 그림 4에서 볼 수 있다. 삭마 현상 후 10ns-50ns까지는 원기둥 모양으로 진행하며 70ns부터 Incident파와 함께 반대편에도 Transmitted파가 발생함을 확인할 수 있다. 이 후(200ns~) 충격파는 반 원 모양으로 발달 되어 진행한다. 충격파의 반 원 지름과 압력, 온도, 속도는 Sedov's point-source blast wave theory[10]를 통해 예측 할 수 있다.

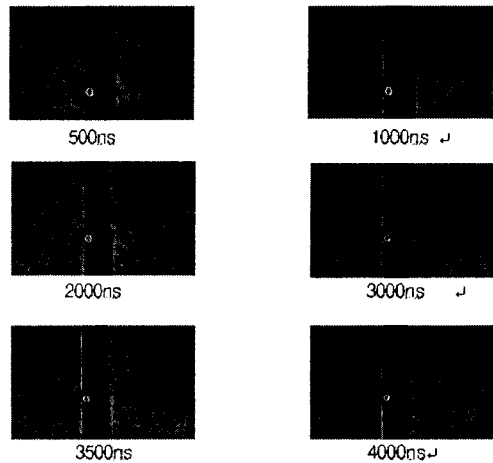
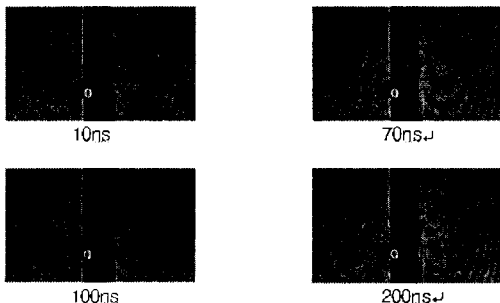


Fig 4. The sequence of images of the single pulse laser-induced thin film ablation

충격파의 압력과 온도는 레이저 조사 후 매우 짧은 순간(~ns) 가장 높고 이후 충격파의 압력은 대기 압력으로 떨어진다.

다양한 종류의 조사물질을 사용하여 물질의 고열변형에 관한 기초연구를 진행하고 있으며 에너지 인텐시티를 조절하여 다양한 Blast Wave질을 실험하고 있다. 약물전달 및 레이저추진에 필요한 핵심연구로 발전시켜나갈 계획이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 기초과학지원사업 (KRF-2006-311-D00038)과 국방과학연구소 고에너지물특화센터 (HM-22)의 지원 하에 수행되었습니다. 가시화 장비구축에 도움을 주신 서울대학교 기계항공공학부 이준식 교수님과 이병희 연구원에게 감사를 드립니다.

참고문헌

[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] X.H. Zeng, X. Mao, s-B. Wen, R. Greif and R.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," *Proc. AJCPP*, ,Beijing, China, 2006.
- [8] J.J. Yoh, K.H. Kim, K.C. Lee, H.H. Lee, and K.J. Park, "Innovative Modeling of shock wave assisted drug particle acceleration," *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, COEX, Seoul, Korea, 2006
- [9] 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.
- [10] L.I. Sedov, *Similarity and Dimension Methods in Mechanics*, Academic, Press New York, 1959