

# 초소형 EFI 착화기의 비행편 특성에 따른 충격과 감쇠 연구

유현주\* · 김보훈\* · 장승교\*\* · 김규형\*\*\* · 여재익†

## A Study on Shock Attenuation according to the Flyer Characteristics of a Subminiaturized EFI detonator

Hyeonju Yu \* · Bohoon Kim\* · Seung-gyo Jang\*\* · Kyu-Hyoung Kim\*\*\* · Jack Jaick Yoh\*†

### ABSTRACT

An experimental and numerical study on shock attenuation in a solid by a subminiature flyer impact was conducted to determine the performance of a subminiature exploding foil initiator such as, flyer velocity and impulse loading. The obtained attenuation pattern shows the possibility to determine the critical flyer velocity for initiating the miniaturized pyrotechnic unit by figuring out shock intensity and duration according to flight characteristics.

### 초 록

충격에 의한 초소형 EFI 착화기의 기폭 성능을 규명하기 위하여 초소형 비행편 충돌 시 발생하는 고체 내 충격 감쇠에 대한 실험 및 수치해석을 수행함으로써 비행편의 충돌 속도와 하중을 계산하였다. 본 연구를 통하여 비행특성에 따른 충격과 강도 및 지속 시간을 결정함으로써 초소형 파이로테크닉 장치의 착화를 위한 비행편의 입계 속도의 예측 가능성을 확인하였다.

Key Words: Shock attenuation(충격과 감쇠), Pyrotechnic(파이로테크닉), EFI, VISAR, Flyer impact (비행편 충돌), Impedance matching(임피던스 정합)

### 1. 서 론

일반적으로 연속적 배열의 폭약 열차 (Explosive train) 시스템은 취급 및 운송에 있어 우발적인 폭발을 방지하기 위하여 물리적 격벽 또는 구조적인 분리가 필수적이다[1]. 하지만

EFI(Exploding foil initiator) 착화기는 중간 구조를 생략하고 비행편의 직접 충돌을 통한 2차 폭약(Secondary explosive)의 충격 점화(Shock initiation)를 유도함으로써 시스템의 소형화 및 단순화가 가능하기 때문에 널리 사용되고 있다 [2,3]. 이와 같이 초소형 파이로테크닉 장치에 대한 수요가 증가함에 따라 초소형 EFI 착화기의 성능 분석을 위한 연구가 요구되고 있다. 따라서 시스템 기폭 성능을 규명하기 위하여 인가 전류에 따른 초소형 EFI 착화기의 비행편 속도 및

\* 서울대학교 기계항공공학부

\*\* 국방과학연구소 제4기술연구본부

\*\*\* ㈜한화중합연구소

† 교신저자, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

충격량 측정이 필요하다.

본 연구는 둔감 폭약인 HNS의 기폭을 위한 초소형 EFI 비행편의 속도 측정을 목표로 진행되었다. 종래의 EFI와는 달리, 초소형 EFI는 비행편은 회전, 굽힘, 파편화라는 비행 특성을 나타내며 측정에 어려움을 야기한다[4]. 따라서 비행편의 속도 대신 비행경로에 관측 시편을 위치시킴으로써 비행편 충돌에 의한 자유표면 속도를 측정하였고, 임피던스 정합 기법(Impedance Matching Technique)을 통하여 비행편의 평균 충돌 속도 및 하중을 구하였다[5,6]. 충돌 면에서 초기 충돌압력을 알기 위해 시편의 두께를 변화시켜가며 거리에 따른 충격파의 감쇠 패턴을 확인하였다. 또한 얇은 시편에서 발생하는 실험적 한계를 극복하기 위하여 수치해석을 수행함으로써 비행편의 특성에 따른 충격파 감쇠를 분석하였다. 따라서 본 연구를 통하여 비행특성에 따른 충격파 강도 및 지속 시간을 결정함으로써 초소형 파이로테크닉 장치의 착화를 위한 비행편의 임계 속도의 예측 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 EFI 비행편 충돌 시험

비행편 충격 점화를 기반으로 하는 EFI 착화기는 안정적이고 반복적인 충격과 생성 장치로, 비행편의 두께 및 충돌 속도의 조절을 통한 충격파 크기 및 지속 시간의 제어가 가능하다[6]. 따라서 본 연구에서는 대상 화약의 점화를 위하여 EFI 착화기를 사용하였으며 개요도는 Fig. 1과 같다.

수천 볼트 전압으로 충전된 캐패시터(Capacitor)로부터 방출된 전류는 좁은 통로를 지나는 다리(Bridge) 구조의 금속 박편(Foil)을 흐르게 된다. 이때 좁은 통로 구조에 의한 높은 저항은 폭발적인 상변화를 야기하며 고온·고압의 플라즈마(Plasma) 생성한다. 단일재인 탬퍼(Tamper) 층에 의해 플라즈마는 금속 박편 방향으로 강하게 팽창하며 비행편을 순간적으로 가속시킨다. 이후 가속된 비행편은 수 km/s의 속도로 총구(Barrel)

을 빠르게 통과하여 대상 화약에 충돌함으로써 충격 점화가 이루어진다.

EFI 착화기의 성능 특성은 인가 전압에 따른 비행편 속도로 정의할 수 있으며, 이를 측정하기 위하여 VISAR 간섭계가 적용되었다. 본 연구는 초소형 파이로테크닉 시스템의 개발을 목표로 수행되었기 때문에, 일반적인 비행편 속도 측정과 달리 상당한 어려움이 따른다. 따라서 마이크로 스케일에서의 정교한 측정을 위해 다음과 같은 작업들이 수행되었다.

VISAR 측정은 초점 크기(Focal spot)보다 큰 편평한 표면 조건의 경우에 적용이 가능하지만 실제 비행편은 매우 얇고 작은 크기로 인하여 회전, 굽힘, 파편화라는 다양한 비행 특성을 나타낸다. 따라서 Fig. 2과 같이 비행 경로에 50~300  $\mu\text{m}$ 의 다양한 두께의 STS304 관측 시편을 위치시키고 비행편 충돌에 의한 시편의 자유 표면 속도를 측정함으로써 충격파 전파 거리에 따른 감쇠를 측정하였다. 비행편은 Kapton 재질의 단일 박막을 사용하여 열전달을 제한함으로써 비행편이 뜯겨 날라 가기 전까지 플라즈마 압력이 최대한 성장할 수 있도록 유도하였다[7]. 또한 초소형 비행편의 충돌은 좁은 면적에 상대적으로 큰 시편의 변형을 야기하기 때문에 0.5~1 mm 초점 크기를 지닌 일반적인 VISAR는 정확한 중심에서의 속도 측정이 어려울 뿐만 아니라 반사된 VISAR 프로브 빔은 쉽게 굴절시킴과 신호 손실이 발생한다[8]. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Fig. 3과 같이 VISAR 프로브의 광학 구성을 설계하였다.

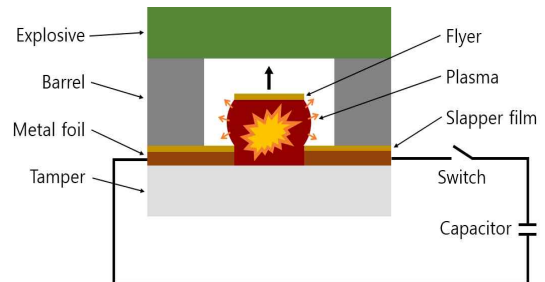


Fig 1 Operation sequence and schematic of an exploding foil initiator.

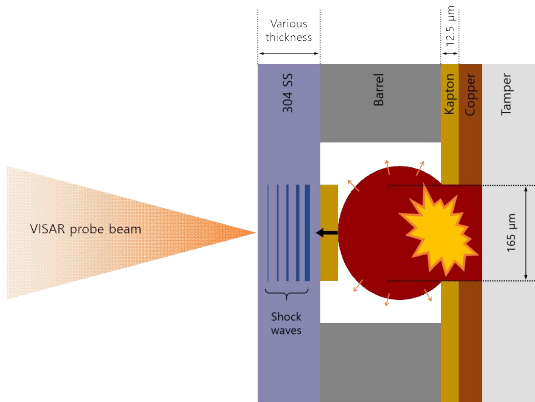


Fig. 2 Schematic of experimental setup for velocity measurement.

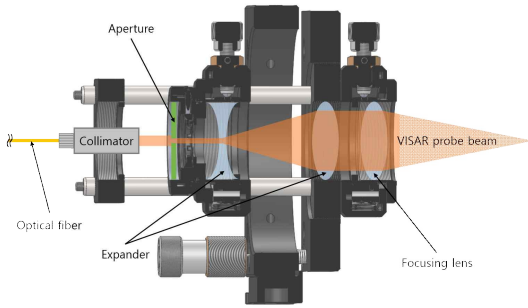


Fig. 3 Assembly configuration of the improved VISAR probe.

시준기(Collimator)를 통해 전달된 레이저 빔은 빔 확장기(Beam Expander)를 지나 볼록 렌즈를 통과 후 시편의 자유표면에 집광된다. 이를 통하여 개구수(Numerical Aperture)를 늘림으로써 빛의 수광각은 0.19 rad까지 증가시키고, 초점 크기는 5 μm으로 축소시킴으로써 정확하고 안정적인 측정을 유도하였다.

## 2.2 고체 내 충격과 거동 해석

본 연구에서는 초고속 비행편 충돌에 의한 고체 내 충격과 해석하기 위하여 ANSYS Explicit Dynamics을 활용한 수치해석을 수행하였다. 매우 짧은 시간 동안 발생하는 큰 하중 조건에서 발생하는 빠르고 비선형 거동을 다루기 위해

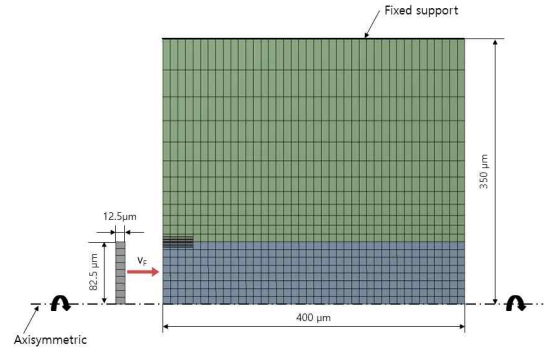


Fig. 4 Geometry and mesh of finite element model for 2-D axisymmetric flyer impact.

Explicit 유한요소법이 사용되었다. Lagrangian 기반의 질량, 운동량, 에너지 편미분 방정식과 함께 물질의 상태방정식 및 경계 조건이 고려되었다. 계산의 안정성을 확보하기 위해 침식(Erosion)을 적용하였으며, 초고속 충돌 모사에 일반적으로 쓰이는 1.5를 한계값(Threshold)으로 설정하였다.

Fig. 4은 2차원 축대칭 비행편 충돌 모사를 위한 형상과 격자를 나타낸다. 700 μm의 직경과 400 μm 두께의 STS304 관측 시편과 165 μm의 직경과 12.5 μm 두께의 Kapton 비행편 형상을 사용하였다. 격자의 크기는 계산의 정확도와 계산 시간을 확보하기 위하여 2 μm 크기의 사각형 격자를 사용하였으며, 비행편의 모서리 부분은 조밀하고 외경으로 갈수록 성기게 생성하였다. 초기 조건과 경계 조건으로는 비행편의 충돌 속도와 관측 시편의 외경의 고정 선으로 각각 설정하였다.

물질 모델에는 Mie-Gruneisen 형태의 Shock E.O.S와 Steinberg-Guinan 구성 방정식이 사용되었다.

$$\begin{cases}
 p = p_H + \Gamma \rho (e - e_H) \\
 p_H = \frac{\rho_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (s - 1)\mu]^2} \\
 e_H = \frac{p_H}{2\rho_0} \left( \frac{\mu}{1 + \mu} \right)
 \end{cases} \quad (1)$$

Table 1. Shock Hugoniot data for 304 stainless steel and Kapton.

Material	$\rho_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c_0$ [m/s]	$S$	$\Gamma_0$
STS304	7900	4570	1.49	1.93
Kapton	1414	2741	1.41	0.76

Table 2. Parameters of Steinberg-Guinan strength model for 304 stainless steel.

$Y_0$	$Y_{max}$	$\beta$	$n$	$G_0$	$G'_p$	$G'_T$	$Y'_p$
6.7e8 Pa	2.5e9 Pa	43	0.35	7.7e10 Pa	1.74	-3.504e7 Pa/°C	7.684 e-3

여기서  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 을 나타내며, 실험 및 이론적 연구로부터 나타나는  $\Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0$  관계를 가정하였다[5,6]. 사용된 비행편과 관측 시편의 Shock Hugoniot 정보는 Table 1에 나타나있다[9,10].

초고속 충돌 현상은 소성 변형의 증가에 따라 항복 강도가 높아지는 가공 경화(Work hardening)가 발생하며 수 GPa 압력의 충격파 거동을 모사하는데 중요한 역할을 한다. 하지만 10 GPa의 압력 혹은  $10^5$  s<sup>-1</sup>의 변형률을 넘어갈 경우, 강한 동적 하중이 높은 온도 상승을 야기 하면서 가공 경화에 대한 변형률의 영향은 급격히 줄어들게 된다. 따라서 이러한 현상을 모사하기 위하여 Steinberg-Guinan 모델을 적용하였고, 전단 탄성 계수 G와 항복 강도 Y에 관한 구성 방정식은 유효 소성 변형, 밀도, 압력, 그리고 온도의 관계로 나타난다.

$$G = G_0 \left\{ 1 + \left( \frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right\} \quad (2)$$

$$Y = Y_0 \left\{ 1 + \left( \frac{Y'_p}{Y_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right\} \times (1 + \beta\epsilon)^n \quad (3)$$

위 식들은  $Y_0(1 + \beta\epsilon)^n \leq Y_{max}$  조건 하에서 적용 가능하다. 여기서  $\epsilon$ ,  $T$ ,  $Y_{max}$ ,  $\eta (= \rho/\rho_0)$ 은 유효 소성 변형, 온도, 최대 항복 강도, 압축률을 나타내며,  $\beta$ 와  $n$ 은 각각 경화 상수 및 지수이다. 하첨자 0은 기준 상태 ( $T=300$  K,  $p=0$ ,  $\epsilon=0$ )을 나타내며, 따옴표와 하첨자는 기준 상태 (Reference state)에서 각각의 하첨자 변수에 따른 미분 값을 표현한다. STS304에 사용된 Steinberg-Guinan 모델 변수는 Table. 2에 나타내었다[11].

### 2.3 실험 및 수치해석 결과

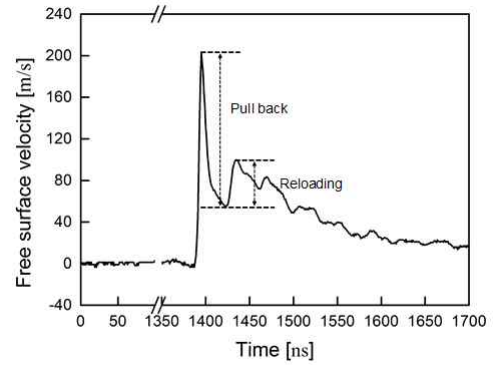


Fig. 5 Temporal profile of the free surface velocity measured by VISAR for a 304 stainless steel target of 100  $\mu$ m thickness at the capacitor charging voltage of 1 kV

Fig. 5는 1 kV 충전 전압 조건에서의 100  $\mu$ m 두께의 STS304에 대한 VISAR 속도 측정 결과를 보여준다. 첫 번째 고점과 그 이후의 고점들은 각각 충격파의 자유표면 도착과 시편 내에서 발생하는 파동의 반사 거동을 나타낸다. 따라서 충격 전선(Shock front)의 강도는 첫 번째 고점 값으로 결정되고, 압력은 Rankine-Hugoniot 조건에 따라 다음과 같이 계산된다[7]. 또한 후퇴 (Pull back)와 재부하(Reloading)신호로부터 충격파와 자유표면에서 반사된 소밀파(Rarefaction wave)의 중첩으로 인한 재료의 파쇄(Spallation)가 발생한 것을 확인하였다.

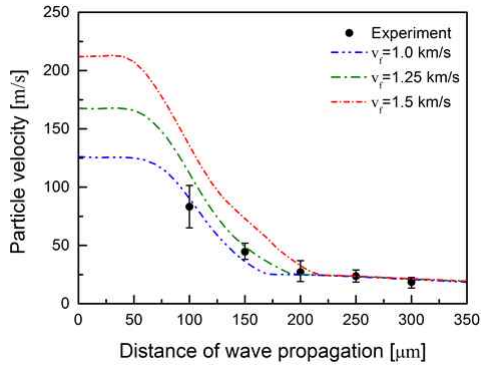


Fig. 6 Particle velocity generated by the shock front according to the distance of wave propagation within a 304 stainless steel target.

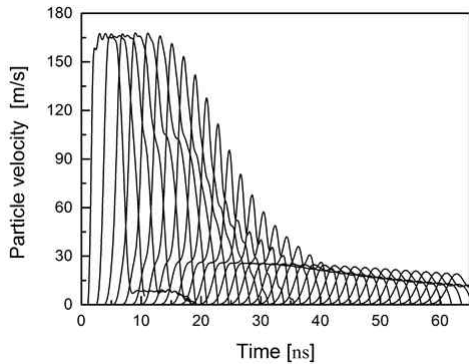


Fig. 7 Temporal profile of particle velocity generated by flyer impact at 1.25 km/s, which are recorded by gauges placed at intervals of 10 μm along the central axis from 0 to 350 μm.

Fig. 6과 7은 다양한 두께의 관측 시편에 대한 VISAR 측정 및 수치 해석을 통해 충격파의 전파 거리에 따른 감쇠 결과를 보여준다. 점과 선은 각각 실험과 수치해석의 결과값을 보여주며, 점과 위아래 캡은 5회 측정의 평균값과 최댓·최솟값을 나타낸다. 비행편의 충돌 시 충격 전선은 충돌 방향으로 전파되며, 약 50 μm 전파 후 충격 하중의 후단에 따라오는 소밀파에 따라 잡히면서 수력학적 감쇠(Hydrodynamic attenuation)

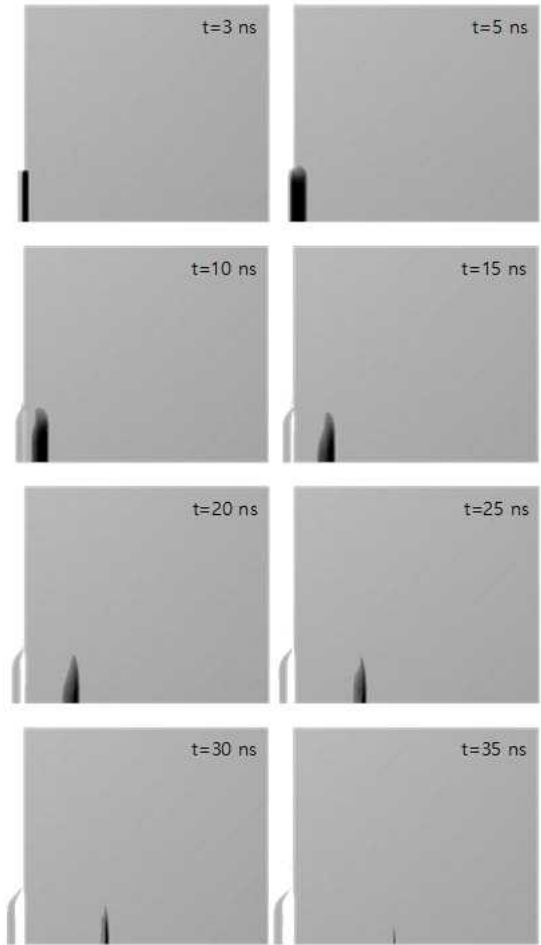


Fig. 8 Pressure contour of a 400 μm thin stainless steel 304 target and a 12.5 μm thin Kapton flyer along the wave propagation when it collides at the velocity of 1.25 km/s.

가 시작된다[6,12]. 따라서 이와 같은 충격파 감쇠 결과로부터 실험과 가장 유사한 수치해석 조건을 찾음으로써 비행편의 속도를 유추하였다. 여기서 수치해석의 충격파 값은 정확히 중심축을 따라 측정이 되는 반면에, 실험에서 VISAR 프로브(Probe) 빔의 초점은 초점 가이드 링(Guide ring)의 공차로부터 최대 25 μm까지 중심축 정렬이 어긋나기 때문에 실험 편차가 고려되어야 한다.

충격파의 압력 감쇠의 주된 요인은 열기계적

(Thermomechanical) 변수로만 연결된 수력학적 감쇠로써, 감쇠 패턴은 초기 충돌 하중의 시간적 형상(Temporal profile)에 의해 크게 영향을 받는다[12].

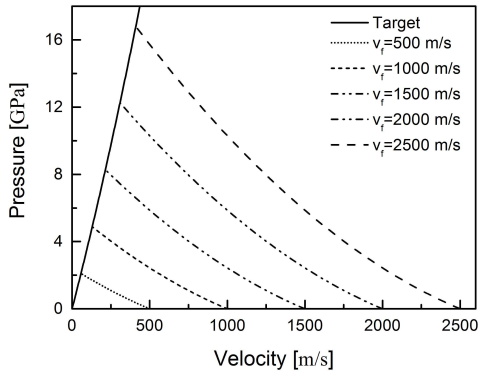


Fig. 9 Forward facing and backward facing pressure-velocity diagram for single shock waves.

또한 초소형 EFI 착화기의 비행편 충돌은 비행편 외경에서 나오는 소밀파 즉, 모서리 영향(Edge effect)에 의해 1 차원 평면파가 유지되지 못하는 형상 감쇠(Geometric attenuation)가 발생하여 충격 전선은 더 멀리 전파하지 못하게 된다[13]. Fig. 8은 1.25 km/s의 비행편 충돌에 대한 압력 등고선(Pressure contour)을 나타낸다. 충격 전선은 약 40 ns 안에 완벽하게 감쇠되면서 탄성파로 변하게 된다. 따라서 50~200  $\mu\text{m}$  두께의 STS304 관측 시편을 통해 충격 감쇠를 분석과 함께 Fig. 9와 같이 임피던스 정합 기법을 적용함으로써 초소형 EFI착화기의 성능 측정 가능성을 확인하였다.

### 3. 결 론

본 연구는 초소형 EFI 착화기의 성능 측정을 목표로 수행되었다. 종래의 EFI 착화기 달리, 초소형 EFI 착화기의 비행편으로 인하여 측정의 어려움이 발생한다. 따라서 비행편의 속도 대신

비행경로에 관측 시편의 자유표면 속도 측정과 임피던스 정합 기법을 통하여 비행편의 평균 충돌 속도 및 하중을 구하였다. 또한 얇은 시편에서 발생하는 실험적 한계를 극복하기 위하여 수치해석을 수행함으로써 비행편의 특성에 따른 충격과 감쇠를 분석하였다. 이를 통해 초소형 EFI 기폭 장치의 성능 측정 시스템을 구축함으로써 초소형 파이로테크닉 장치의 개발 및 최적화의 가능성을 확인하였다. 현재는 본문에서 언급한 바와 같이 충격 감쇠 패턴의 편차에 대한 분석을 위하여 비행편의 중심축 정렬과 비행편의 크기에 따른 충격과 거동 연구를 진행하고 있다.

### 후 기

본 연구는 '유도탄용 고성능 PMD 기술' 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. 또한 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구 결과입니다

### 참 고 문 헌

1. Ebenhoch, S., Nau, S., & Haring, I, "Validated model-based simulation tool for design optimization of exploding foil initiators," *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 189-207, 2015.
2. Nappert, L., "An Exploding Foil Initiator System," *Defence Research Establishment Valcartier*, 1996.
3. Schwarz A. C., "Study of factors which influence the shock-initiation sensitivity of hexanitrostilbene (HNS)," No. SAND-80-2372.

- Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA), 1981.
4. Yu, H., Fedotov, V., Baek, W. and Yoh, J. J., "Towards controlled flyer acceleration by a laser-driven mini flyer," *Applied Physics A*, Vol. 115, No. 3, pp. 971-978, 2014.
  5. Forbes Jerry W., *Shock wave compression of condensed matter: a primer*, Springer Science & Business Media, Heidelberg, German, 2013.
  6. Antoun T., *Spall fracture*, Springer Science & Business Media, New York, U.S.A., 2003.
  7. Yu, H., Jungwook Kim and Jack J. Yoh, "A high velocity impact experiment of micro-scale ice particles using laser-driven system," *Journal of Applied Physics*, Vol. 116, No. 17, pp. 173508, 2014.
  8. D. Dennis-Koller, J. P. Escobedo-Diaz, E. K. Cerreta, C. A. Bronkhorst, B. Hansen, R. Lebensohn, H. Mourad, B. Patterson and D., Tonks. "Controlled shock loading conditions for microstructural correlation of dynamic damage behavior," *AIP Conference Proceedings-American Institute of Physics*, Vol. 1426, No. 1. pp. 1325-1330, 2012.
  9. Marsh, S. P., *LASL shock Hugoniot data Vol. 5*, Univ of California Press, 1980.
  10. May, C. M., Tarver, C. M., Elert, M., Furnish, M. D., Anderson, W. W., Proud, W. G. and Butler, W. T., "Modeling short shock pulse duration initiation of Lx-16 and Lx-10 charges," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 11, No. 1, pp. 275-278, 2009.
  11. Steinberg, D. J. "Equation of State and Strength Properties of Selected Materials," 1996, Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-MA-106439.
  12. Duvall, G. E., "Maxwell-like relations in condensed materials," *Iranian Journal of Science and Technology*, Vol. 7, pp. 57-69, 1978.
  13. Boustie, M., Cuq-Lelandais, J., Bolis, C., Berthe, L., Barradas, S., Arrigoni, M., De Resseguier, T., and Jeandin, M., "Study of damage phenomena induced by edge effects into materials under laser driven shocks," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 40, No. 22, p. 7103, 2007.