

광열고압 충격현상에 대한 예비 실험

Preliminary Experiments of Laser Induced Shock Phenomena

김 선 철* 최 윤 수* 한 충 규* 조 경 호* 김 형 원*

Sun Cheol Kim Yoon Soo Choi Chung-kyu Han Kyung Ho Cho Hyoungwon Kim

Abstract

A high power laser beam focused on a small area accelerates a thin material that flies and hits other target material in which a shock wave may be induced. This laser induced shock experimental method is more repeatable and cheaper but worse than other experimental method using gas gun or other apparatus. An optical system including a phase zone plate reduces the interference and also makes the focused-beam-intensity distribution uniform. We wrote a computer code that calculates light ray traces. Using the code we designed and fabricated an optical system including a phase zone plate and improved the laser-beam uniformity. We introduce preliminary experimental results of laser induced shock of the samples such as aluminum and other materials.

Keywords : Laser(레이저), Shock(충격), Phase Zone Plate(위상영역판)

1. 서론

광열 구동 실험에서는 고출력 펄스 레이저를 작은 면적에 집속하여 비행체를 가속시키고 그 비행체가 표적에 충돌할 때 발생하는 표적 물질의 충돌 현상을 계측한다^[1,2]. 이 실험은 개스건이나 다른 장비를 사용하는 충격실험보다 반복성이 높고 저렴하다는 장점이 있으나 정밀도가 낮다는 단점이 있다. 실험 장비의 개념도는 Fig. 1과 같다. 수 백 마이크로미터의 크기로 집속된 고출력 레이저 펄스가 비행체 박막에 조사되면 그 박막은 레이저에 의해 가열되고 일부가 용발되어 그 전면에 고온고압의 플라즈마

가 발생한다. 비행체는 이 플라즈마에 의해 가속되어 박막 시료에 충돌한다. 계측시스템에서 입사되는 VISAR(Velocity Interferometer for Any Reflector)의 두 빔은 비행체의 속도와 시료의 충격과 도달 시간을 기록한다.

본 논문에서는 레이저를 균일하게 집속하는 Phase Zone Plate(PZP)에 대한 원리와 제작 상수들을 간략히 설명하고 제작된 PZP를 이용하여 가속한 비행체의 속도를 계측한 결과를 정리한다. PZP에 의해 집속된 레이저 빔의 세기 분포를 CCD 카메라로 포착한 실험에 대하여 설명하며 비행체의 위치 별로 바이저 프로브를 적용하여 속도를 계측하고 위치별 속도 분포를 분석한다. 레이저에 의해 수 km/s로 가속된 알루미늄 비행체를 철과 알루미늄 등의 시료에 충격시키는 광열구동 충격실험의 예비 실험 결과에 대해 보고한다.

† 2011년 8월 1일 접수~2011년 11월 4일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 김선철(sckim@add.re.kr)

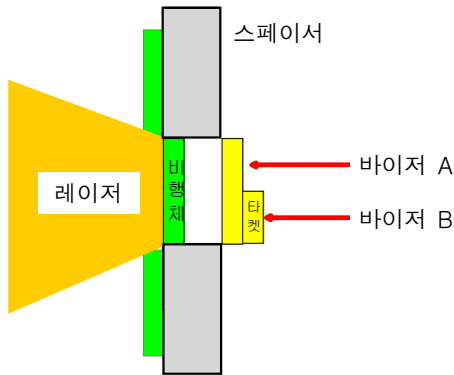


Fig. 1. 비행체와 시료의 충돌

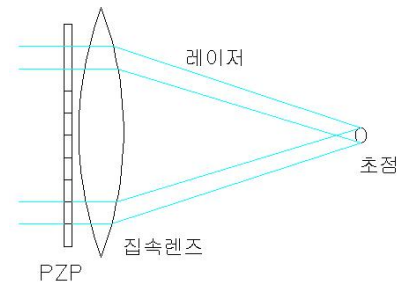


Fig. 2. PZP와 집속렌즈의 조합 광학계에 의해 집속되는 레이저

2. 레이저 균일화

고출력 펄스 레이저를 균일하게 집속하기 위해서 렌즈배열 광학계나 Phase zone plate를 사용한다. 렌즈배열 광학계는 레이저 빔이 균일하게 집속되지 않고 중심에서 가장자리로 갈수록 약해지는 세기 분포를 이룸을 보이므로^[3] 서로 다른 위상차를 갖는 Fresnel 렌즈들의 조합을 이용하는 Phase Zone Plate(PZP)가 주로 사용된다. 이 Fresnel 렌즈가 볼록렌즈와 다른 점은 두께가 다른 Fresnel 렌즈들은 그것들을 통과한 광의 위상차를 다르게 한다는 점이다. 또 하나의 다른 점은 Fresnel 렌즈들은 평평하기 때문에 구면 수차가 없다는 점이다. 이러한 점들이 Phase zone plate가 렌즈배열보다 레이저를 더 균일하게 집속하는 것으로 알려져 있다^[4].

Fig. 2와 같이 여러 개의 Fresnel 렌즈들을 위상을 다르게 하여 무작위로 배열시킨 PZP와 그 뒤에 하나의 집속 렌즈계를 사용하면 레이저를 한 초점에 집속할 수 있다. 이 광학계를 통하여 초점에 집속된 레이저는 초점에서의 위치에 따라 위상이 달라지므로 많은 수의 작은 스파이크 빔들로 나뉜다. 이렇게 나누어진 스파이크 빔들은 그 크기가 일반 렌즈를 사용하여 집속시킬 때 발생하는 간섭무늬보다 작으며 그 크기와 위치는 무작위적으로 분포된다. 이 스파이크 빔들의 크기가 전자의 평균자유행정 λ_1 보다 작으면 전자들이 빔들 사이를 자유롭게 움직이므로 전자들과 플라즈마는 균일하게 분포되며 비행체도 균일하게 가속될 수 있다.

λ_1 은 다음과 같다^[5].

$$\lambda_1 = \frac{7.2 \times 10^{12} T_e^2}{n_e \ln A} \text{ (cm)} \quad (1)$$

여기서 T_e 는 전자온도(eV)이고 n_e 는 전자밀도(cm^{-3})이다. 전자온도 T_e 가 300 eV이고 n_e 가 $10^{20}/\text{cm}^3$ 이면 플라즈마 압력은 약 13 GPa이고 고밀도 플라즈마에서 $\ln A \sim 5$ 이므로 λ_1 은 약 13 μm 가 된다.

3. PZP 제작

실험에 사용되는 레이저의 파장 λ 는 1053 nm이고 집속렌즈의 초점거리 f_L 이 300 mm이다. 식 (2)는 간섭 무늬의 초점 주위의 레이저 최소 세기가 되는 원의 지름 W_s 와 Fresnel 렌즈의 직경 W_z , Fresnel zone의 개수 N , 집속렌즈의 초점거리 f_L 등과의 관계를 나타낸다^[4].

$$W_s \approx 4 \frac{N\lambda}{W_z} f_L \quad (2)$$

Fresnel zone의 개수 N 을 2로 하면 Fresnel 렌즈의 크기 W_z 가 Fig. 3의 모델과 같이 5.0272 mm(반경 2.5136 mm)일 때 W_s 는 502 μm 가 된다. Fresnel zone의 개수를 최소값인 2로 한 이유는 레이저 빔을 보다 많은 수의 렌즈에 통과시키게 하기 위함이다.

Fig. 4는 위상차가 180° 인 두 종류의 Fresnel 렌즈들을 무작위로 배열시킨 하나의 PZP 모델이다. 판의 재질인 Fused silica는 레이저 파장 1053 nm 빛에 대한 굴절률이 1.4496이고 두께 0.7 mm 일 경우 투과율은 93 %이다. 레이저의 반 파장 위상차를 얻기 위한 요철의 깊이는 1.171 μm 이다.



Fig. 3. 초점거리는 같고 위상차가 180° 다른 두 종류의 Fresnel 렌즈 모델. 유색인 곳이 레이저 파장의 0.5배 경로차가 나도록 식각되는 부위임.

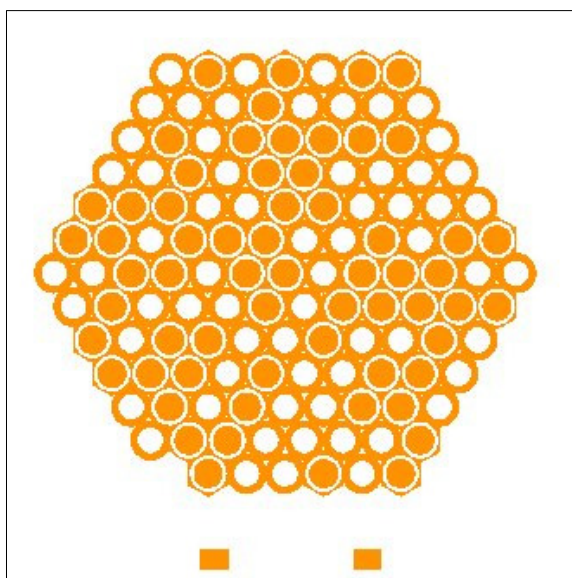


Fig. 4. PZP 모델 1. 위상차가 180° 다른 두 종류의 Fresnel 렌즈들이 무작위로 배열됨

이 깊이를 수직으로 정밀하게 파내야 하므로 반도체 공정으로 식각한다. 직경이 약 54 mm인 실험용 레이저는 104개 정도의 Fresnel 렌즈를 통과하게 된다. 무작위로 배열되는 렌즈의 개수가 100개 이상이므로 초점에 집속되는 빔은 간섭이 사라질 것으로 기대된다. Fig. 4의 아래 부분의 사각 모양은 공정 후에 공정의 정확성을 측정하기 위한 일종의 표시이고 실제 실험에서는 불필요하다. Fig. 4는 AutoCAD 프로그램에 의해 그려져 dxf 형식의 파일로 변환되어 마스크 제작회사인 토판 포토마스크에 보내졌다. 마스크는 7"×7"×150 mil(1 mil = 0.001 inch)의 크롬 도포된 수정을 노광하여 0.2 μm 정밀도의 패턴을 만든다. 제작된 마스크는 나노소자특화랩센터에 보내져서 건식 식각에 사용되었다.

4. 집속광학계의 성능확인

제작된 PZP와 집속렌즈를 Fig. 2와 같이 배열하고 집속광학계로부터 약 300 mm 떨어진 초점 부근에 IR CCD 카메라를 놓고 앞뒤로 움직이면서 집속되는 레이저의 영상을 포착하였다. Fig. 5의 결과에서 가장 선명한 영상인 (나)가 초점 영상이고 그 앞뒤 1 mm 내의 영상들과 비교된다. 초점 영상은 약 200 μm 크기를 갖는 중심의 집속 빔과 주위에 2차, 3차 등의 회절 광들로 구성되어 있다. 집속 빔은 스파이크 빔들로 구성되어 있고 그 위치와 밝기가 무작위적으로 분포되어 있다. 이는 Fresnel 렌즈들이 무작위적으로 분포된 PZP에 의해 레이저가 잘게 쪼개져서 초점에 집속되기 때문이다. 이 스파이크 빔들이 작기 때문에 균일한 플라즈마가 생성되며 비행체가 평탄하게 가속될 것으로 기대된다.

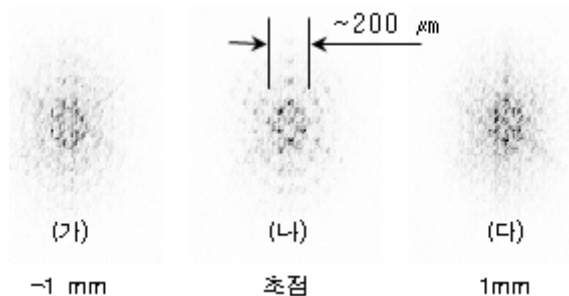


Fig. 5. 초점을 중심으로 앞뒤로 1 mm 씩 CCD 카메라를 이동시키면서 계속한 영상

5. 비행체 시편 가속 실험

속도 계측을 정밀하게 하기 위하여 Fig. 6과 같이 바이어 프로브를 하나만 사용하여 속도를 측정했다. 두 개의 바이어 프로브를 사용할 경우에는 서로의 간섭 효과 때문에 계측 오차가 생길 수 있기 때문이다. 레이저는 렌즈 배열과 집속 렌즈를 통과하여 200 μm 지름의 원형 면적에 집속된다. 비행체 뒤에 스페이서가 놓여 가속된 비행체는 150 μm의 거리를 비행한 후 유리 기판에 부딪힌다.

레이저 에너지는 레이저가 챔버에 입사되는 창(반사율 3 %)에서 반사되는 빔을 에너지미터로 측정하여 환산했고 실험에서는 34 J 부근이다. 동일한 출력 값

으로 레이저를 발진 증폭시켜도 레이저 출력은 발진 때마다 약간씩 달라진다. 두께 40 μm 의 알루미늄 박막에 레이저를 조사하고 바이저 프로브 빔을 비행체 뒷면에서 약간씩 위치를 변동시키면서 속도를 측정했다. 비행체 시편의 중심이라 추정되는 위치를 중심으로 x-축과 y-축 상으로 50 μm 씩 이동되었다. 바이저에 사용된 에탈론의 길이는 20 mm이고 한 번의 주기는 속도가 5500 m/s로 환산된다.

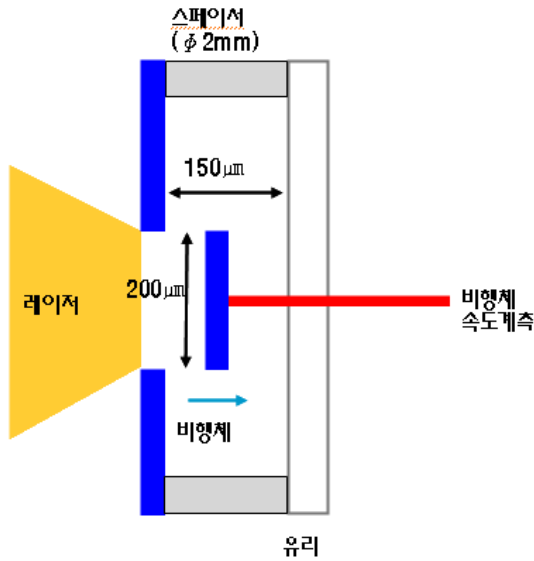


Fig. 6. 비행체 속도계측 시스템 개념도

비행체가 비행하는 동안의 편평도를 알아보기 위하여 위치별 속도를 Fig. 7과 같이 레이저의 상대세기 분포와 함께 하나의 그래프에 도시하였다. 레이저의 상대 세기는 Fig. 5(나)의 CCD 영상을 x-축과 y-축을 따라 스캔하여 얻은 데이터이다. 그림에서와 같이 x-축과 y-축 상의 직경 약 200 μm 이내의 레이저 스팟들의 피크 세기가 일정하고 이 반경 이내에서의 비행체 속도도 6000 m/s 부근에서 거의 일정함을 알 수 있다. 초점 밖의 점들에서는 2000 m/s 이하로 계측되었다.

시료가 알루미늄 40 μm 이고 레이저 에너지는 34~38 J인 유사한 실험조건에서 렌즈 배열을 사용한 경우의 실험에서는 집속된 레이저 빔이 Gaussian 분포를 이루었고 이에 따라 비행체 속도도 중심에서 가장 높고 주위로 갈수록 서서히 낮아지는 불균일한 분포를 이루었다^[3].

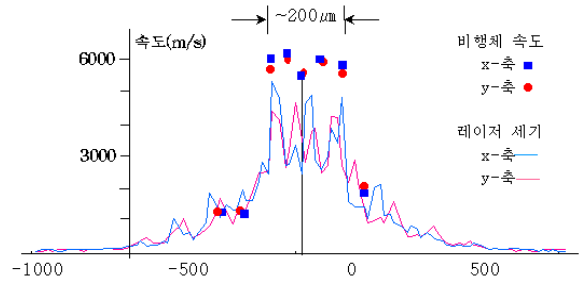


Fig. 7. 반경방향 위치별 빔세기 분포와 비행체 속도. 빔세기와 비행체 속도는 중심 약 200 μm 영역에서 균일한 값을 가진다.

6. 광열구동 충격실험 장치

실험에 사용된 레이저는 파장이 1053 nm이고 펄스 폭이 11 ns인 펄스형 Nd:YIF 레이저이다. 챔버는 그 지름이 800 mm이고 몸통의 높이가 620 mm이며 로타리 펌프로 배기하여 2×10^{-2} Torr 이하의 진공에서 실험한다. 레이저 입사를 위하여 400×400×400 mm의 사각 플렌지를 부착하고 그 전면에 지름 100 mm의 창 4개에 고출력 레이저 용 창(1053 nm 광에 대한 투과율 99%)을 장착하였다. 챔버 벽의 아랫부분과 옆면에는 20개의 창이 있어서 전기신호를 전달하는 feed-through나 진공튜브를 연결할 수 있다.

챔버 내부에 설치된 광학소자들의 배치는 Fig. 8과 같다. 표적 홀더에는 구멍이 25개가 뚫려 있어서 비행체와 시료를 홀더에 고정시키고 그 홀더를 진공 챔버에 장착하여 진공을 유지시켜 실험하면 최대 25회의 레이저 실험이 가능하다. 구멍 중 일부는 시료 없이 비행체만 고정하여 바이저가 비행체의 속도를 계측할 수 있도록 고정한다. 시료 홀더에 시료를 고정하고 홀더를 챔버에 장착시킨 후 레이저와 프로브 빔을 표적에 정렬시키면 시료들은 동일한 정렬 상태를 가지며 동일한 조건에서 실험이 이루어진다. 원격 컴퓨터와 컨트롤러에 의해 작동되는 진공용 3축이송장치(Aerotech 사)는 시료를 위에 붙들고 x축으로 150 mm, y축과 z축으로 50 mm의 이송거리를 2 μm 의 정확도로 원하는 위치에 이송시킨다. 여기서 z축은 레이저의 빔과 평행한 방향이고 y축은 위아래 방향이다. 집속렌즈(한국전광 제작)는 초점거리 400 mm 또는 500 mm를 사용하고 1.053 μm 광에 대하여 99%의 투과율을 갖는다. 범용 모니터링 CCD 카메라는 시료의 레이저 조

사 전후의 상태를 확대하여 모니터에 보여준다. 계측용 레이저 프로브는 렌즈계를 통과한 후 시료의 뒷면에서 반사되며 VISAR 간섭계에서 위상차가 읽혀진다. 이 위상차 정보는 비행체의 속도와 시료의 충격파 도달 시간을 알려준다.

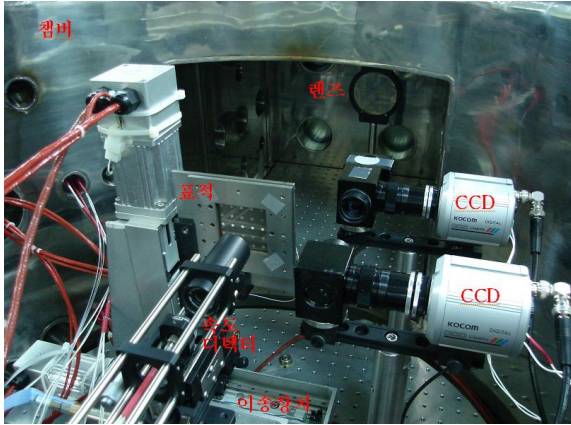


Fig. 8. 레이저 챔버 내부 부품 배치

7. 속도 계측 실험

비행체의 속도를 알기위해서 충격실험 이전에 물질 별로 비행체의 속도를 계측했다. 레이저는 PZP와 집속 렌즈에 의해 시료에 집속된다. 레이저 에너지의 변화에 따른 속도 증가의 경향이 물질 별로 Fig. 9와 10에 도시되어 있다. Fig. 9는 두께가 각각 30, 40, 60, 100 μm 인 알루미늄 박막, Fig. 10은 Al-PI-Al(두께 Al 100 nm, PI 120 μm , 20 μm) 3층 박막과, Fe 25 μm , Cu μm 등의 박막들을 가속시켜 얻은 속도들이다.

레이저 에너지의 증가에 따라 속도가 증가함과 비중이 높은 Fe와 Cu의 속도가 알루미늄에 비하여 낮음을 보인다. 알루미늄의 최대 속도는 두께 40 μm 에 대하여 레이저 에너지가 27 J 일 때 2.7 km/s 이다. 두께가 30 μm 일 때는 레이저 에너지가 20 J 이하에서만 속도가 측정되었다. 그 이상의 에너지에서는 박막이 너무 많이 용발되기 때문에 비행체가 평탄하게 비행하지 못하고 속도 계측신호가 왜곡되었다. Al-PI-Al 박막의 Al 100 nm 면에 레이저를 조사시키면 금속 알루미늄이 레이저를 흡수하여 플라즈마화되고 그 플라즈마가 레이저를 흡수하는 매질이 되어 투명한 PI까지 완전하게 용발시키고 뒤의 알루미늄 20 μm 박막을 가속시킨다.

동일한 레이저 에너지에 조사된 알루미늄 40 μm 박막도 이와 비슷한 속도로 가속되는 결과로 보아 레이저에 의해 용발되는 알루미늄의 두께는 약 20 μm 임을 알 수 있다.

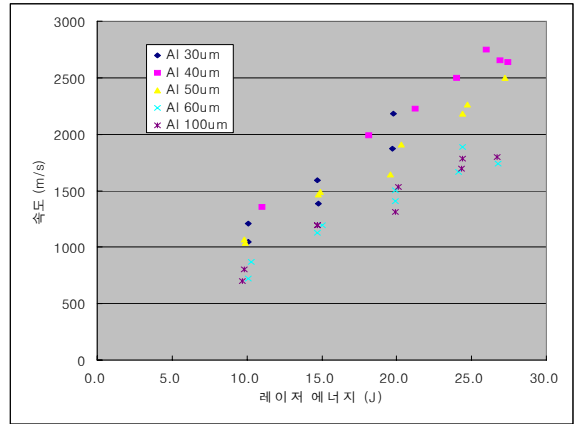


Fig. 9. 에너지에 따른 알루미늄 비행체 속도

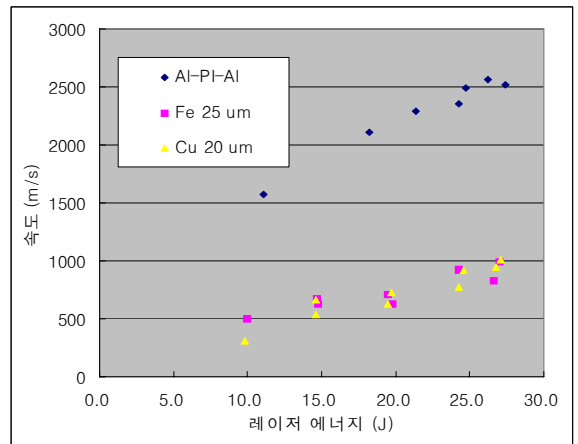


Fig. 10. 에너지에 따른 AL-PI-Al, Fe, Cu 비행체 속도

8. 충격 실험

충격실험 개념도인 Fig. 1에서 표적 시료는 반쪽은 1 단, 나머지 반쪽은 2단의 박막으로 구성되어 있다. 비행체는 150 μm 를 비행한 후 2단 표적에 충돌된다. 비행체의 속도는 매 측정시마다 재현성이 있으므로 충격 실험 전에 표적 시료 없이 바이저로 측정한다. 본 충격 실험에서의 알루미늄 40 μm 의 비행체의 속도는 2.2

km/s 이다. 비행체가 표적 시료에 충돌하면 시료 내에 충격파가 발생하여 진행하는데 1단과 2단의 두께차이에 의해 뒷면에 도달하는 시간이 달라진다. 뒷면에 조사되는 두 개의 VISAR 빔들은 이 시간차로 도달되는 충격파들의 속도를 측정한다.

두께 40 μm인 알루미늄 시료에 대한 6회의 실험 결과가 Table 1과 같다. 계측 오실로스코프의 시간 분해능은 0.5 ns 이다. 시간차의 평균은 5.83 ns이고 표준편차는 0.54 ns이다. 두께 40 μm를 이 속도로 나누면 충격파속도가 6.86 km/s로 계산된다. 비행체의 속도는 2.2 km/s이므로 동일물질 충돌조건에 의해 입자속도 U_p 는 1.1 km/s 이다. 이 값과 알루미늄 충돌 상수들($S = 1.34, C = 5.33\text{km/s}$)을 식 (3)에 대입하면 표준 충격파속도 6.804 km/s가 계산된다. 충돌시 경계면의 압력이 동일하다는 식을 이용하면 충돌압력은 20.9 GPa로 계산된다. 실험 평균 충격속도와 표준 충격속도의 차이는 0.055 km/s 이어서 상대오차는 1 % 이내이지만 실험 편차가 9.5 %에 이른다. 계측 분해능 0.5 ns는 계측값의 8.5 %나 되어 이 편차가 실험오차인지 계측 오차인지 판별하기 어렵다. 계측값에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 분해능이 높은 계측시스템구축이 요구된다. Fig. 11은 알루미늄 충격 속도와 입자속도의 표준 그래프에 실험 데이터를 도시한 것이다.

$$U_s = C + S \times U_p \quad (3)$$

Table 1. Al-Al 충격파 도달시간 계측 결과

시험	A점 충격파 도달시간	B점 충격파 도달시간	시간차	두께
1	96.0 ns	102.0 ns	6.0 ns	40 μm
2	89.5 ns	106.0 ns	6.5 ns	40 μm
3	96.0 ns	102.0 ns	6.0 ns	40 μm
4	103.0 ns	108.0 ns	5.0 ns	40 μm
5	101.5 ns	108.0 ns	6.5 ns	40 μm
6	103.0 ns	108.0 ns	5.0 ns	40 μm

두 번째 실험에서는 속도 2.2 km/s 알루미늄 비행체를 2단의 25 μm 철 박막 시료에 충돌시키며 충격 시간을 계측하였다. 7회의 실험 결과는 Table 2와 같다. 시간차의 평균은 5.4 ns이고 표준편차는 0.117 ns 이다.

두께 25 μm를 이 속도로 나누면 충격파속도가 4.63 km/s로 계산된다. 충돌시의 경계면 압력이 동일하다는 조건에서 각 물질에 대해 식 (3)을 이용하여 이종물질 충돌을 계산하면 철($C = 3.57 \text{ km/s}, S = 1.92$)의 표준 충격파속도는 5.0 km/s 이다. 이 표준값과 계측값의 차이는 -0.37 km/s 이어서 상대오차는 7.4 %이며 계측 분해능과 유사하다. 실험에서 계측된 속도를 충격방정

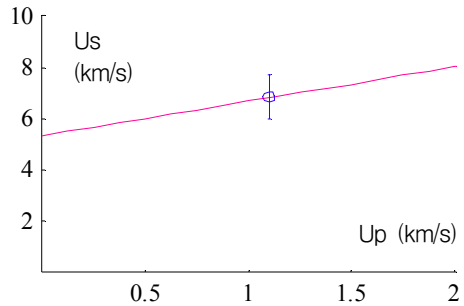


Fig. 11. 알루미늄 유고니어 표준곡선과 실험 데이터

Table 2. Al-Fe 충격파 도달시간 계측 결과

시험	A점 충격파 도달시간	B점 충격파 도달시간	시간차	두께
1	106.0 ns	111.5 ns	5.5 ns	25 μm
2	63.5 ns	68.5 ns	5.0 ns	25 μm
3	58.0 ns	63.5 ns	5.5 ns	25 μm
4	58.0 ns	63.5 ns	5.5 ns	25 μm
5	121.0 ns	126.0 ns	5.0 ns	25 μm
6	148.0 ns	153.0 ns	5.0 ns	25 μm
7	140.5 ns	146.0 ns	5.5 ns	25 μm

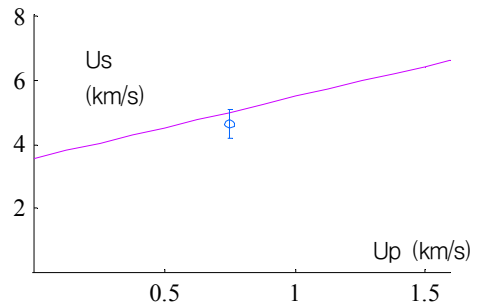


Fig. 12. 철 유고니어 표준곡선과 실험 데이터

식에 대입하여 풀면 철과 알루미늄 충돌시의 압력은 29.4 GPa로 계산되었다. Fig. 12는 철의 충격 속도와 입자속도의 표준 그래프에 실험 데이터를 도시한 것이다.

9. 결론

레이저 빔의 균일한 집속을 기하기 위하여 하나의 phase zone plate를 제작하여 사용하였다. 빔 세기분포의 측정결과는 직경 약 200 μm 이내의 집속 면에서 빔 세기가 균일하였다. 이는 Gaussian 분포와 유사한 세기분포를 주는 렌즈 배열을 사용할 때의 결과보다 향상된 결과이다. 속도 측정을 통하여 빔 세기 분포가 원주 방향으로 대칭을 이룸을 유추할 수 있었다. 두께 40 μm 인 알루미늄의 비행체 부위별 속도 측정은 레이저 집속 크기인 200 μm 직경 내에서 비행체가 약 6000 m/s의 속도로 편평하게 날아감을 보였다. 비행체는 중앙 부위에서 속도가 오히려 작고 반경 100 μm 부근에서의 속도가 약간 큼을 보인다. 이는 집속된 레이저 빔의 세기가 중앙보다 가장자리가 더 섬을 간접적으로 보인다. 두께 40 μm 의 알루미늄 박막을 비행체로 하여 알루미늄과 철 등의 표적에 충격시키는 유고니어 실험을 착수하였다. 충격실험에서 2.2 km/s의 속도로 비행하는 알루미늄 비행체 박막이 표적에 충돌할

때의 충격 속도를 측정하여 표준 데이터와 비교하였다. 측정 데이터와 표준 유고니어 데이터의 오차는 8% 이내로 두 데이터는 비교적 근접하다. 이러한 오차는 측정 시스템의 오차인 약 9%와 비슷하므로 향후 시간 분해능이 높은 측정 시스템을 이용하면 오차를 줄일 수 있다.

References

- [1] S. N. Luo, et al, "Long Pulse Laser Driven Shock Wave Loading for Dynamic Materials Experiments", Proc. of SPIE, Vol. 7005, pp. 700514~700516, 2008.
- [2] N. Ozaki, et al, "Planar Shock Wave Generated by Uniform Irradiation from Two Overlapped Partially Coherent Laser Beams", J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 5, pp. 2571~2575, 2001.
- [3] 김선철, 한충규, 최윤수, 김형원, "광열구동 비행체 가속실험(1)", 국방과학연구소 보고서 TEDC-S620-065013, 2006.
- [4] D. Batani, C. Bleu, and Th. Lower, "Design, Simulation, and Application of Phase Plates", Eur. Phys. J. D, Vol. 19, pp. 231~235, 2002.
- [5] F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics, Plenum Press, p. 137, 1974.