

고속충돌 시험용 지능형 다중 카메라 시스템 개발

정동택* · 박치영* · 진두한* · 김태연* · 이주연* · 이인석**†

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Development of Intelligent Multiple Camera System for High-Speed Impact Experiment

Dong Teak Chung*, Chi Young Park**, Doo Han Jin**, Tae Yeon Kim**,
Joo Yeon Lee** and Ihnseok Rhee**†

* School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education.

(Received December 29, 2012 ; Revised July 8, 2013 ; Accepted August 6, 2013)

Key Words: High-Speed Impact(고속충돌), Speed-Measuring(속도측정), Photodiode Array Sensor(배열 광센서), Sequential Trigger(순차적 트리거)

초록: 방탄소재로서 사파이어 재료가 대두되고 있지만 고속 충돌관련 동적거동 및 파괴특성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 탄자와 취성세라믹재료간의 상호작용을 연구하기 위해서는 고화질의 초고속 연속영상이 필수적이다. 본 연구에서는 고속충돌 및 관통 현상을 순차적으로 촬영할 수 있는 장치를 개발하였다. 이 장치는 속도측정장치, 마이크로프로세서를 사용한 카메라 구동장치 그리고 다수의 CCD카메라로 이루어져있다. 선형배열센서를 사용한 속도측정장치는 직경 1-2 mm 탄자의 마하 3 속도를 측정할 수 있다. 발사된 탄자가 속도측정장치를 통과하면 속도와 시간이 측정되고 탄자가 비행하는 동안 카메라 구동장치가 정확한 충돌시간을 계산하여 다수의 카메라에 순차적으로 트리거 신호를 보내서 충돌 전후의 형상을 순차적으로 촬영한다. 정확한 충돌시간 예측을 못하면 고해상도의 사진촬영이 거의 불가능하다. 본 연구에서 개발된 정밀 촬영장치를 사용하여 고해상도의 영상을 확보할 수 있었다.

Abstract: A single-crystal sapphire is used as a transparent bulletproof window material; however, few studies have investigated the dynamic behavior and fracture properties under high-speed impact. High-speed and high-resolution sequential images are required to study the interaction of the bullet with the brittle ceramic materials. In this study, a device is developed to capture the sequence of high-speed impact/penetration phenomena. This system consists of a speed measurement device, a microprocessor-based camera controller, and multiple CCD cameras. By using a linear array sensor, the speed-measuring device can measure a small (diameter: up to 1-2 mm) and fast (speed: up to Mach 3) bullet. Once a bullet is launched, it passes through the speed measurement device where its time and speed is recorded, and then, the camera controller computes the exact time of arrival to the target during flight. Then, it sends the trigger signal to the cameras and flashes with a specific delay to capture the impact images sequentially. It is almost impossible to capture high-speed images without the estimation of the time of arrival. We were able to capture high-speed images using the new system with precise accuracy.

1. 서 론

무기체계의 방탄소재로서 단결정 사파이어가

대두되고 있지만 기계적 물성연구는 부족한 실정이다. 사파이어와 같이 경도와 취성이 높은 재료는 고속충돌로 만들어진 응력, 변형, 파괴상태 등이 충돌 후 시간과 충돌위치에 따라 빠르게 변화하게 된다. 재료의 특성을 파악하려면 응력 또는 변형상태가 단순하고 일정하게 유지되는 실험방법을 사용해야 하지만 고속 변형에 관계되는 실

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, rhee@kut.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

험방법은 매우 제한적이고 고가의 대형장비가 요구되며 변형이 진행되고 있을 때 재료내부에서 일어나는 상태를 관찰하는 것은 거의 불가능하다.⁽¹⁾ 그러므로 충돌 순간과 충돌 후 재료의 외부 변화를 관찰하는 충돌시험과 시뮬레이션 등을 통해 재료내부에서 진행되는 상태를 추측해야 한다.

참고문헌^(2,3)에서는 시험체가 고속으로 물방울을 충돌하는 것이 아니라 물방울이 고속으로 비행하여 시험체에 충돌하는 새로운 방법을 제시하여 소규모실험실에서 저비용으로 고속충돌 현상과 고속 침식현상을 모사할 수 있도록 하였다.

고속의 탄자와 시험체가 충돌하는 모습을 관찰하기 위한 고속카메라의 역사는 매우 길다.⁽⁴⁾

디지털 카메라 이전에는 회전 프리즘을 이용한 광학식 카메라방식이 널리 사용되었다. 이 방식들은 촬영할 수 있는 프레임 수가 제한되어 있어서 정확한 트리거가 필수적이다. 그러나 대부분의 경우 정확한 촬영개시 시점을 예측하는 방법에 어려움이 많다. 이후 초고속 디지털 카메라(High Speed Camera)와 획기적으로 증가된 메모리로 인해 정확한 트리거에 대한 부담이 일부 감소되었다. 즉 이벤트가 발생하기 전부터 끝까지 메모리가 소진될 때까지 촬영한 후 필요한 영상을 찾아내는 방식이 가능해 졌다.

현재 일반적인 초고속카메라는 촬영속도가 낮을 때는 전체 화면을 모두 저장하지만 촬영속도가 빠르면 화면의 일부분만 사용하므로 해상도가 감소한다. 저자 소속 기관에서 보유하고 있는 REDLAKE사의 MotionPro X4 카메라는 5000fps(초당 5000 프레임) 경우 해상도가 512x512 이지 만 140,000fps 일 때는 해상도가 16x16으로 급격하게 저하된다.

1000m/s이상의 초고속으로 비행하는 2-3mm 직경의 탄자의 충돌 모습을 촬영하려면 최소한 초당 1,000,000fps의 고가의 초고속카메라가 필요하다. 그리고 관자가 1 μ s동안 1mm를 이동하므로 촬영영상에 이동방향으로 잔상이 발생한다. 따라서 더욱 빠른 사양의 카메라가 필요하다. 그러나 최고 사양의 카메라는 메모리처리속도의 한계로 획득할 수 있는 영상수가 작다. 예를 들어 specialised imaging사의 최고사양 Kirana 카메라는 최대 2,000,000fps, 해상도: 924x768, 영상수: 180이다. 따라서 정확한 트리거가 필수적이다.

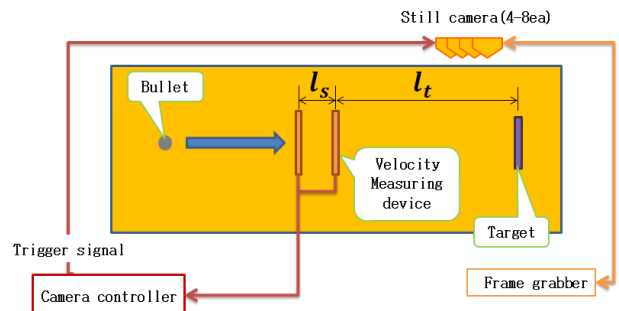


Fig. 1 Schematic of high-speed camera system

본 논문에서는 4개의 CCD 스틸카메라를 사용하여 1,000,000fps에 해상도가 659x494인 초고속 촬영을 할 수 있는 지능형 촬영시스템을 개발하였다.

2. 고속 소형 탄자 충돌촬영시스템

본 연구에서는 초고속으로 발사된 탄자가 타겟에 충돌한 후 탄자와 타겟이 시간에 따라 진행되는 파괴양상을 포착하려 한다.

Fig. 1은 탄자 촬영장치의 개략도이다. 장치는 속도측정장치, 촬영제어장치, 그리고 촬영장치로 구성되어 있다.

2.1 속도측정장치

고속 물체의 속도를 측정하기 위한 방식은 접촉식과 비접촉식이 있다. 접촉식의 경우 양쪽에 전기가 전도될 수 있는 알루미늄 호일을 배치하고 중간에 종이를 배치하여 탄자가 지나갈 때 양쪽 호일에서의 통전반응으로 탄자의 유무를 판단한다.⁽⁵⁾ 일반적으로 자중과 크기가 큰 물체에서는 접촉식이 많이 사용되지만 사파이어 재료의 특성 파악을 위한 초고속충돌 실험과 같이 매우 작은 탄자(직경2.38mm, 무게0.6g)를 사용하는 실험에서는 탄자의 무게가 가볍기 때문에 스크린을 통과할 때마다 속도가 크게 감소되어 측정된 속도는 신뢰할 수 없으며 충돌시험 후 결과분석에 방해요소로 작용한다.

비접촉식 센서는 Fig. 2와 같이 도트 레이저와 수광센서(Photodiode)를 일직선상에 배치해 탄자가 지나갈 때의 빛의 변화를 감지하여 탄자의 유무를 판단한다. 비접촉식이므로 탄자의 속도저하는 발생하지 않지만 도트레이저를 사용하는 방식이라 측정범위가 좁아 탄자가 정확하게 지나가지

못하면 속도측정이 불가능하다. 사파이어 재료의 특성파악을 위한 초고속충돌 실험에서는 탄자의 크기가 매우 작아서 발사장치에서 정확한 탄도방향을 만들기에 한계가 있고 중력의 영향으로 탄자가 정확하게 일직선으로 발사될 수가 없다. 그러므로 앞서 설명한 방식으로는 소형의 탄자를 제대로 측정할 수가 없다.

여기서 사용된 Fig. 3의 비접촉식 센서는 리본레이저와 16채널 배열 광센서를 사용하여 기존 도트레이저를 사용한 센서에 비해 측정범위가 넓어져 탄자의 크기와 움직임이 불규칙하더라도 측정범위 안에만 통과하면 측정이 가능하다. Fig. 3은 16채널 배열 광센서를 사용한 속도센서의 구조이다.

센서는 라인 레이저, 실린더 렌즈, 16채널 배열 광센서(Photodiode array)로 구성된다. 물체의 통과유무는 라인레이저에서 실린더 렌즈에 레이저를 조사하면 실린더 렌즈를 거쳐 굴절되어 평행한 리본레이저(Ribbon laser)로 바뀌고 이를 16채널 배열 광센서에 비추면 센서의 길이를 폭으로 갖는 측정면이 만들어진다. 이렇게 만들어진 평면에 탄자가 지나가면 Fig. 4 와 같이 순간적으로 빛의 변화가 생겨 배열 광센서 중 몇 개가 반응하게 된다. 배열 광센서

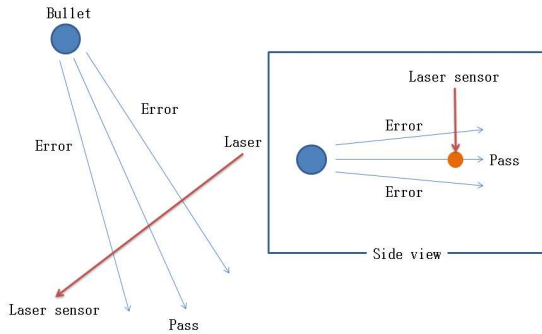


Fig. 2 Line laser with single sensor

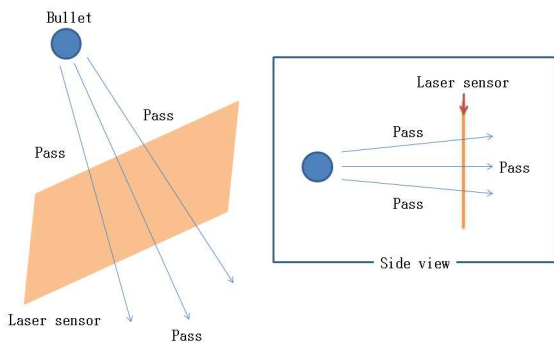


Fig. 3 Ribbon laser with multi-channel array sensor

출력을 신호처리하여 Fig. 5(a)와 같이 OR 게이트에 통과시키면 탄자의 통과유무를 알 수 있다.

본 논문에서 사용한 광센서는 광 다이오드 형으로 Fig. 4와 같이 구성하여 빛의 유무를 판단한다. Fig. 5(b)에서 광센서 출력인 V_s 는 저항 R_2 의 크기에 비례하고 광센서의 반응속도는 반비례한다. R_2 로 500k Ω 저항을 사용하였을 때 광센서에 빛이 비추어지면 약 200mV의 출력신호를 얻을 수 있다. 하지만 이 경우 200m/s이상의 속도에서는 광센서가 탄자의 통과유무를 감지하지 못하였다. 이 속도에서는 2mm의 탄자가 센서를 통과하는 시간이 10 μ sec이하이어서 센서가 반응을 하지 않는다. 고속 탄자 실험을 위해서는 센서의 반응속도를 높일 필요가 있다.

R_2 값을 내리면 반응속도는 빨라지나 출력신호의 크기는 작아진다. 센서 출력의 크기가 수 mV로 작아지면 신호가 잡음에 매우 민감하기 때문에 가능하면 R_2 를 크게 설정하는 것이 유리하다. R_2 를 변경하면서 실험을 수행하여 20k Ω 일 때 1200m/s의 탄자의 속도를 측정할 수 있었다. 이때 V_s 는 수 mV 레벨로 측정되었고 Fig. 4에서 기준신호를 조절하여 탄자가 통과할 때 비교기 출력이 5V가 되도록 하였다.

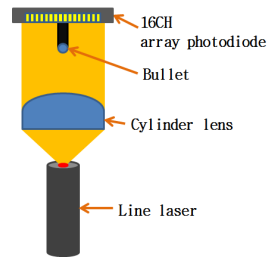
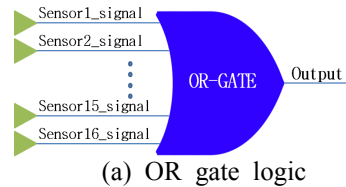
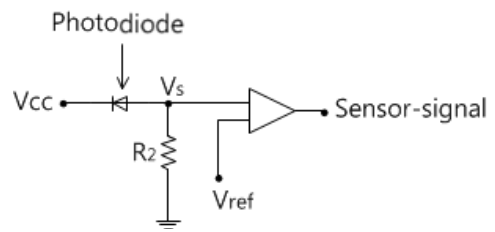


Fig. 4 Speed measuring device with ribbon laser and multi-channel array sensor



(a) OR gate logic



(b) Sensor circuit

Fig. 5 OR gate logic and sensor circuit

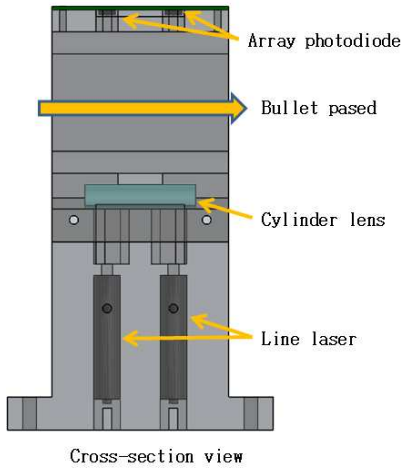


Fig. 6 Speed measuring device

Fig. 6은 리본레이저, 16채널 배열 광센서, 실린더 렌즈로 구성된 속도 측정장치를 나타낸다.

2.2 촬영제어장치

CCD 스틸카메라를 사용하여 초고속 이벤트를 촬영하기 위해서는 빠른 속도의 셔터와 정확한 이벤트 발생 시각 확보 그리고 연속적으로 다수의 카메라를 구동하는 제어장치가 필요하다.

초고속으로 발사된 탄자가 Fig. 1의 l_s 거리에 있는 두 개의 속도측정센서를 통과하는데 걸리는 시간으로 탄자의 속도를 계산하고 이를 기준으로 Fig. 1의 l_t 거리에 있는 표적에 탄자가 도달하는 시간을 예측할 수 있다.

탄자가 포구에서 발사되고 표적에 도달하기 전에 실시간으로 정확한 충돌시각을 마이크로프로세서를 사용하여 계산할 수 있으므로 탄자속도 편차에 무관하게 정해진 위치에서 탄자를 촬영할 수 있다.

예측된 도달시간을 기반으로 제어장치는 여러 대의 스틸카메라에 순차적으로 트리거 신호를 보낸다. 트리거 신호의 간격을 1μsec로 설정하면 1,000,000fps의 초고속카메라가 촬영하는 연속영상을 4대의 스틸카메라로 얻을 수 있다.

탄자 촬영장치는 탄자의 속도를 기반으로 한다. 속도 측정값은 속도측정 센서로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{V} = \frac{l_s}{\hat{T}_s} = \frac{l_s}{T_s + \Delta t} \approx \frac{l_s}{T_s} - \frac{l_s}{T_s^2} \Delta t \quad (1)$$

여기서 \hat{V} 는 속도 측정값, T_s 와 \hat{T}_s 는 각각 속도 측정센서 통과시간의 실제값과 측정값, Δt 는 시

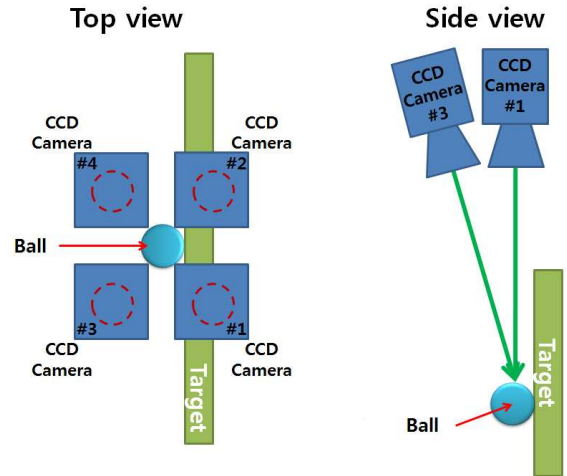


Fig. 7 Camera placement

간측정오차를 나타낸다. 식 (1) 우변의 첫 번째 항은 탄자의 실제속도를, 두 번째 항은 속도측정 오차를 나타낸다. 속도측정오차를 실제속도로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{l_s}{T_s^2} \Delta t \right) / V = \frac{V}{l_s} \Delta t \quad (2)$$

여기서 $V = l_s / T_s$ 는 실제 속도 그리고 ΔV 는 속도측정오차를 나타낸다. 시간측정을 기반으로 속도를 측정하기 때문에 속도측정오차는 속도에 비례한다. 구성된 시스템에서 l_s 는 50mm이고 시간 측정에 사용하는 마이크로컨트롤러의 동작속도는 16MHz이므로 Δt 의 최대값은 1/16μsec이다. 식 (2)로부터 속도측정오차는 다음과 같다.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V}{l_s} \Delta t = 1.25 V \times 10^{-4} \% \quad (3)$$

본 시스템이 촬영하고자 하는 탄자의 최대속도인 1200m/s에서 속도측정오차는 0.15%이고 속도가 느릴수록 오차는 줄어든다.

탄자의 속도가 감속되지 않을 때 탄자가 목표에 충돌하는 시점의 예측 정확도는 속도측정오차와 다음 관계가 있다.

$$\hat{T}_t = \frac{l_t}{\hat{V}} = \frac{l_t}{V + \Delta V} \approx \frac{l_t}{V} - \frac{l_t}{l_s} \Delta t \quad (4)$$

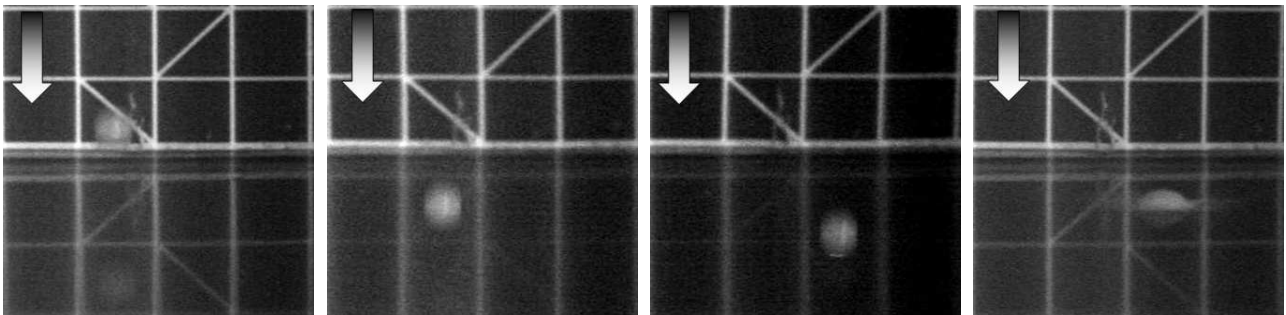
여기서 \hat{T}_t 는 충돌시점의 예측 값이다. l_t 는 목표물의 종류에 따라 변경된다. 식 (4) 최우변의 두 번째

Table 1 Camera controller error budget

Velocity (m/s)	Velocity error (%)	Target prediction error(mm) ($l_s=300mm$)
300	0.0375	0.1125
600	0.075	0.225
900	0.1125	0.3375
1200	0.15	0.45

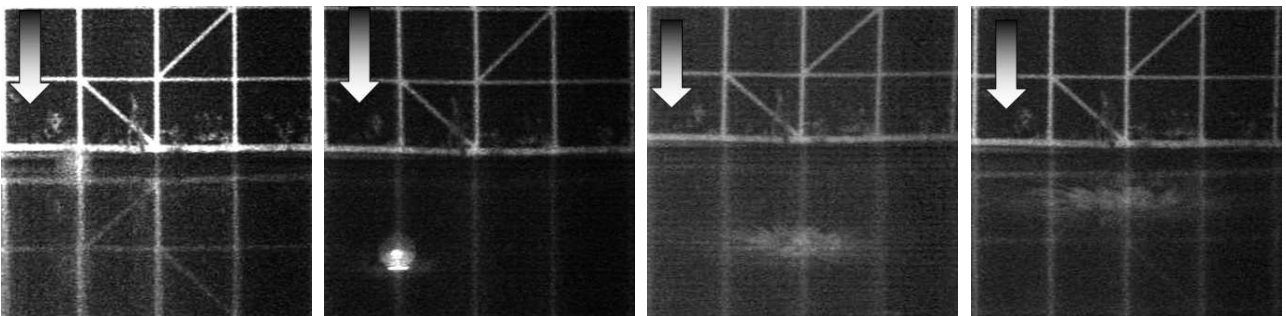
Table 2 Material properties of POM and AL_2O_3

	POM	AL_2O_3
Name	Polyacetal	Sapphire
Density	1.41	3.41
Hardness	R116	Mohs 9.0
Tensile strength(Mpa)	690	1800
Size (mm)	2.385	50x50



(a) -10 μ sec (camera No. 0) (b) -5 μ sec (camera No. 1) (c) 0 μ sec (camera No. 2) (d) 5 μ sec (camera No. 3)

Fig. 8 High speed photo of ball impact test (ball speed: 395m/s, frame rate 5 μ sec)



(a) -5 μ sec (camera No. 0) (b) 0 μ sec (camera No. 1) (c) 5 μ sec (camera No. 2) (d) 10 μ sec (camera No. 4)

Fig. 9 High speed photo of ball impact test (ball speed: 612m/s, frame rate 5 μ sec)

항은 목표물 도달 예측시간의 오차를 나타내며 탄자의 속도와는 무관하다. 이는 $l_t = 300mm$ 일 때 0.375 μ sec이다. 이를 탄자의 비행거리로 환산하면 0.45mm이다. Table 1은 속도에 따른 속도측정오차와 목표물 도달 예측지점오차를 보여준다.

2.2 촬영장치

촬영장치는 4대의 CCD 스틸카메라와 4채널 프레임 그래버(frame grabber), 그리고 PC로 구성되어 있다. 4대의 카메라는 Fig. 7과 같이 시야각이 조금씩 다르게 설치되었다. 일반적인 프레임 그래버

의 사용방식은 외부에서 트리거 신호를 프레임 그래버로 전달하고 이를 다시 카메라로 전달하여 촬영하는 것이다. 그러나 이 방식은 프레임 그래버 내부 클럭(clock)을 사용하므로 msec 단위의 조절이 불가능하다. 따라서 촬영제어장치가 각각의 카메라에 독립적으로 트리거 신호를 보내 촬영을 시작하고 영상데이터를 확보한 후(약 1/30sec 소요) 카메라로부터 프레임 그래버를 사용하여 PC로 영상데이터를 받는 방식을 사용하였다. μ sec 단위의 트리거 신호에 의해 촬영이 개시되게 하기 위하여 카메라 내부 클럭을 기준으로 프레임

그래버가 작동하고 촬영개시 순간에 카메라 내부 클럭이 리셋(reset) 되는 랜덤트리거(random trigger) 방식을 사용하였다. 이를 위하여 4채널의 독립 구동 프레임 그래버를 사용하였다.

3. 측정장치 검증

3.1 시험재료

시험에 사용된 탄자는 우박알갱이와 물성치가 유사한 POM볼을 사용하였으며 시험체(표적)로는 사파이어를 사용하였다. 사파이어와 POM 볼의 물성치는 Table 2와 같다.

3.2 시험 결과

POM 볼의 세라믹 블록에 대한 고속충돌시험을 탄자속도가 395m/s와 612m/s에 대하여 수행하였다. Fig. 8과 Fig. 9에서 충돌 전후 볼의 변형 및 파괴양상을 확인할 수 있다. 사진간 시간간격을 5 μ s로 설정하였고 충돌시각을 0초로 설정하였다. Fig. 7과 같이 배치되어 시야각이 조금씩 다른 4개의 스틸카메라를 사용하여 순차적으로 촬영하였기 때문에 사진을 사용한 속도계산은 오차가 많이 발생한다.

Fig. 8(a),(b)에서 볼이 진행방향으로 늘어져 보인다. 이는 스틸카메라의 셔터속도가 1/800,000 sec 이므로 촬영 중 395m/s의 탄자가 0.5mm정도 이동하여 잔상이 만들어 진다.

Fig. 8(c)에서 0초에서 볼과 세라믹 블록의 충돌이 개시된 것을 확인할 수 있다. 이는 탄자 속도 측정과 목표물 도착시간 계산이 정확하게 이루어졌음을 알 수 있다.

Fig. 8(d)에서 탄자가 시험체에 부딪힌 후 변형이 많이 진행되었으나 아직 파손이 시작하지는 않았다.

Fig. 9(a)에서 셔터속도가 1/800,000sec 이므로 촬영 중 612m/s의 탄자가 0.8mm정도 이동하여 잔상이 만들어 진다.

Fig. 9(b)에서는 탄자가 시험체와 고속으로 충돌하면 급격한 온도상승에 의하여 밝은 빛이 나는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 9(c)에서 Fig. 8과 다르게 7 μ s에서 볼이 바스러지며 파괴되는 현상을 관찰할 수 있다. POM 볼재료의 고속파괴 모드가 변형속도에 따라 변한

다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 초고속충돌 시험을 수행할 때 탄자와 시험체가 충돌하고 변형, 파괴되는 과정을 저비용으로 효과적으로 촬영할 수 있는 초고속 촬영장치를 개발하였다. 개발 장치는 속도측정장치, 촬영제어장치 그리고 4대의 CCD 스틸카메라로 이루어진 촬영장치로 구성되어 있다. 속도측정장치는 리본레이저와 16채널 배열 광센서를 사용하여 최대 1200m/s로 비행하는 반투명 소형탄자의 속도를 측정할 수 있도록 구성되었다. 마이크로프로세서 기반의 촬영제어장치는 측정된 탄자 비행속도를 기반으로 탄자의 목표물 도달 시간을 실시간으로 계산하고 이 시간 전후에 다수의 스틸카메라로 순차적인 촬영을 하여 초고속 연속영상을 확보할 수 있었다. 촬영장치의 성능을 평가하기 위해 고속으로 비행하는 반투명 소형탄자 충돌시험을 수행하였으며 촬영결과로부터 개발된 장치의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Field, J. E., 1999, "ELSI Conference: Invited Lecture: Liquid Impact: Theory, Experiment, Applications," *Wear*, Vol. 233-235, pp. 1~12.
- (2) Chung, D.T., Jin, D. H. and Kang, H., 2008, "Development of a New Rain Erosion Test Method," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 22, Nos. 9,10&11, pp. 1056~1061.
- (3) Chung, D.T., Jin, D. H. and Kang, H., 2009, "Development of a High Velocity Rain Erosion Test Method," *Proc. of KSME Fall Annual Meeting*, pp. 226~229.
- (4) Pendley, G., 2003, "High-Speed Imaging Technology; Yesterday, Today & Tomorrow," *25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics*, Proceedings of the SPIE, Volume 4948, pp. 110~113.
- (5) Chung, D.T., Rhee, I., Joo, B.Y., Jin, D.H., Rim O.K. and Park, K.J. 2012, "Development of a Soft Recovery System of Supersonic Projectiles," *IPPT PAN*, Vol. 60, 1, pp. 3~14.