

점탄성 고체의 고속 관통 실험 및 시뮬레이션

High Speed Penetration Test and Simulation of Viscoelastic Solid



윤길호*



김기현**



윤충희**

* 한양대학교 기계공학과 교수

** 한양대학교 기계공학과 석·박사 통합과정

1. 서론

이 기사에서는 본 연구진이 새롭게 연구를 시작하고 있는 점탄성 물체의 고속충돌의 해석 및 실험이라는 주제를 소개하려 한다. 본 기사에서 언급하는 고속충돌은 마하 1에서 마하 3정도의 속도로 두 물체가 충돌하여 발생하는 현상을 의미한다.

컴퓨터 하드웨어와 계산 이론 및 수치 알고리즘의 비약적인 발전을 통하여 현재 전산역학 분야는 기계, 항공, 조선, 토목, 건축 등의 다양한 분야에서 중요한 역할을 하고 있다. 10년전에는 슈퍼 컴퓨터에서만 다룰 수 있었던 충돌 및 분자역학 해석 등도 이제는 각 연구실에 구축한 고성능 워크스테이션이나 PC에서도 해석이 가능해 졌고 멀지 않은 미래에는 스마트 기기에서도 가능해지리라 믿는다. 이런 비약적으로 발전하는 컴퓨터 하드웨어의 발전에 힘입어 전산역학 분야는 앞으로도 계속 발전하리라 생각된다.

하드웨어의 비약적인 발전과 더불어 기존에는 해석하기 어렵거나 불가능했던 현상을 해석하기 위한 전산역학 분야의 새로운 이론 연구도 속속 개발이 되고 있다. 예를 들어 DNA해석 분야, 분자해석 분야, 다물체 역학 해석 분야, 파괴(Fracture)역학 분야 등 다양한 분야에서 기존에 해석이 불가능했던 물리 현상들을 위한 전산해석 이론이 개발이

되고 있으며 해석이 가능해지고 있다. 그러나 하드웨어의 발전 속도에 비하여 전산역학 이론의 발전 속도는 상대적으로 늦다. 예전에는 이런 현상이 소프트웨어의 모듈화가 어렵다는 속성때문이라고 이해했으나 C++나 Python 등의 모듈화 언어의 개발이후에도 그리 개선되고 있지는 않은 것 같다. 저자들은 물리현상의 이해, 전산해석 이론의 개발과 구현이 어렵고 시간이 많이 들기 때문에 점점 사람들의 관심에서 멀어지고 중요도가 떨어지는 것은 아닌가 생각된다. 특히 본 기사에서 소개하려는 점탄성 물체의 고속충돌의 해석은 물리현상 및 이론의 이해가 복잡할 뿐 아니라 해석이론이 오래전에 개발되었기 때문에 이론이 개발되었을 때 수행하였던 연구진이 남아 있지 않고 자료도 구하기 어려워 이론 개발과정에서의 물리현상에 대한 여러 가정들을 정확하게 이해하기가 어려운 문제점이 있다. 다른 전산역학 분야와 비교하여 산업계의 이론의 수요도 적고 관심도도 떨어져서 고속충돌 분야는 새로운 해석 이론을 개발하는게 상대적으로 어렵고 거의 불가능하지 않을까 생각된다. 이와 더불어 상용 소프트웨어와 비슷한 해의 정확성과 계산의 효율성 가진 In-house코드를 개발한다는 것은 본 연구진의 소견으로는 거의 불가능하며 기존의 상용 소프트웨어 회사들도 기술 개발이 중단되거나 아예 회사 자체가 파산하여 아주 중요한 해석 코드들이 없어지거나 다른 회사

에 흡수되는 현상이 일어나고 있다. 우리나라에서는 이런 초고속 충돌의 해석기법이 다른 나노, 바이오, 멤스 등의 중요 연구 분야에 비하여 중요성이 줄어들고 있으며 몇 년의 연구를 통하여 한 편정도 연구 논문을 작성할 수 있기 때문에 아쉽게도 이제는 석박사 학생들의 주제로 부적합해지고 있다. 이런 이유로 학계에서는 한국뿐 아니라 전 세계적으로도 이 분야를 제대로 연구하는 연구단이 손꼽을 정도로 줄어들었다.

고속충돌 분야의 해석은 재현성이 어려운 실험에 기반한다. 본 기사에서 다루는 고속충돌은 두 가지 이상의 물체가 상대속도가 마하 1에서 마하 3정도로 충돌하는 것을 의미한다. 독자들도 쉽게 상상할 수 있듯이 이런 고속충돌은 재현성을 가지고 실험을 하기가 여러 이유로 어렵다. 첫 번째로 일정한 고속으로 움직이는 물체를 실제로 만들기 어렵다. 이런 속도의 움직임을 만들기 위한 장치는 학교 연구실에서 갖추기는 아주 어렵다. 일반적인 권총은 마하 1 정도의 속도를 가지며 장총은 사양에 따라 총탄을 마하 3까지 속도로 날려보낸다. 이런 마하의 속도를 가지는 물체는 저속에서는 무시할 수 있는 미시적인 기하학적 조건, 물체의 무게의 미묘한 변화량, 주위 온도 및 화약의 차이, 사수의 미세한 떨림등 초기 조건 및 주위의 영향이 고속충돌 현상에 큰 영향을 미친다. 그렇기 때문에 정확한 위치에 일정한 속도로 고속 물체를 반복해서 발사하기가 거의 불가능하다. 특히 총기 규제가 심한 우리나라에서는 더 실험하기 어렵다. 두 번째로 재료의 초고속 거동을 알기가 어렵다. 해석 이론 관점에서는 저속에서 사용하던 탄소성 거동 및 점탄성 모델은 사용할 수 없으며 같은 변형이라 하더라도 변형률 속도에 따라 재료의 스트레스가 달라지는 이론을 사용해야 한다. 또한 재료가 고속 충돌로 인하여 파괴되면서 국부적으로 기체 및 유체의 거동을 보이기 때문에 이를 위하여 현상에 맞는 EOS(Equation of State)등을 이용하여 해석을 진행하여야 한다. 전산해석을 위하여 이런 재료의 거동을 알아야 하는데 이런 재료의 거동은 실험이 어려우며 다른 나라에서 구축하고 있는 데이터에 접근하기가 불가능하다. 세 번째로 해석과 실험결과를 정량적으로 맞추기가 어렵다. 정적해석은 현재 기술 수준은 거의 1%이하의 에러로 변형을 예측할 수 있고 보수적으로 잡아도 동적 해석은 에러가 15%를 넘지 않는다. 그러나 고속 충격으로 가면 실험자체가 재현성이 거의 없기 때문에 통계적으로 실험결과를 처리해야 하며 해석도 알려지지 않는 물성치 거동을 가정해서 해석해야 하기 때문에 정량적인 비교보다는 정성적인 비교를 할 수밖에 없다. 마지막으로 실험자체가 고가의 기자재가 필요하고 심각한 사고의 위험성이 있다. 마하 1이

상의 충돌을 실험해야 하기 때문에 우리나라에서는 안전시설이 갖추어진 사격장에서 실험을 해야 하고 일반인은 법적으로 이런 목적으로 사격을 할 수 없다고 한다(그림 1). 그래서 숙련된 사격자가 사격을 해야 한다. 고속으로 변형하는 현상 측정을 위해 일반적인 변위 및 가속도계 등은 사용하기가 아주 어려우며 가끔 가속도계의 허용 가속도를 넘기 때문에 고가의 가속도계가 망가지는 문제점도 있다. 이런 이유로 약 2만 FPS이상의 고속 카메라를 주로 사용한다. 다음절에서부터 이런 어려움을 극복하며 본 연구단이 수행한 초기 수준의 고속충돌의 실험과 충돌해석에 대한 연구 내용을 간략하게 소개하려 한다.

2. 젤라틴 관통 실험

관통현상은 탄환 또는 포탄의 파편 등과 같은 물체가 빠른 속도로 다른 구조물을 관통하는 현상을 말하며, 관통하는 물체가 가지고 있는 매우 큰 에너지가 관통 당하는 물체에 소산되는 에너지 메커니즘을 동반한다. 이런 관통현상은 총탄이 사람의 몸을 관통하는 현상의 해석을 목표로 한다. 일반적으로 알려진 관통현상은 탄환 자체가 유발시키는 인체 손상보다 탄환이 가지는 속도와 각속도에 의해 발생하는 손상이 더 큰 것으로 알려져 있으며 탄환의 종류, 속도, 각속도, 관통 각도 등에 따라 차이가 난다. 탄환이 인체를 관통하면 인체의 저항력 때문에 탄환이 인체 내에서 회전을 하게 되는데, 이 탄환의 회전력은 인체 손상의 결정적 원인이라고 할 수 있으며, 탄환이 관통되면서 나타나는 탄환의 파괴 유무에 따라 인체에 다양한 손상을 주는 것으로 보고되어 있다.

본 연구에서는 인체와 유사한 물성치를 가진다고 알려진 젤라틴 블록을 제작하였으며 권총을 이용하여 관통 실험을 수행 하였다. 젤라틴은 인체와 유사한 물성치를 가지기 때문에 관통실험에 자주 사용되며 젤라틴과 물의 혼합정도에 따라 다양한 물성치를 표현할 수 있다. 일반적으로 관통실험에 사용되는 젤라틴 블록은 10%, 20%의 젤라틴이 포함된다. 본 연구단에서는 크기는 가로 30cm, 세로 15cm, 높이 15cm로 제작하였다. 총탄이 관통할 때 젤라틴 블록에 미치는 피해정도를 충분히 판단하기 위해 젤라틴 블록의 길이를 30cm로 지정하였다.

사격에 사용된 권총은 9mm탄환이 사용하였으며 정확한 실험을 위해 숙련된 사격자가 사격을 실시하였다. 거리는 사격전문가의 조언에 의해 10m 선정되었다. 관통 실험결과 탄환이 가지는 큰 에너지가 젤라틴 블록으로 소산되어 젤라틴 블록이 파괴된 결과를 얻을 수 있었다. 관통 실험에

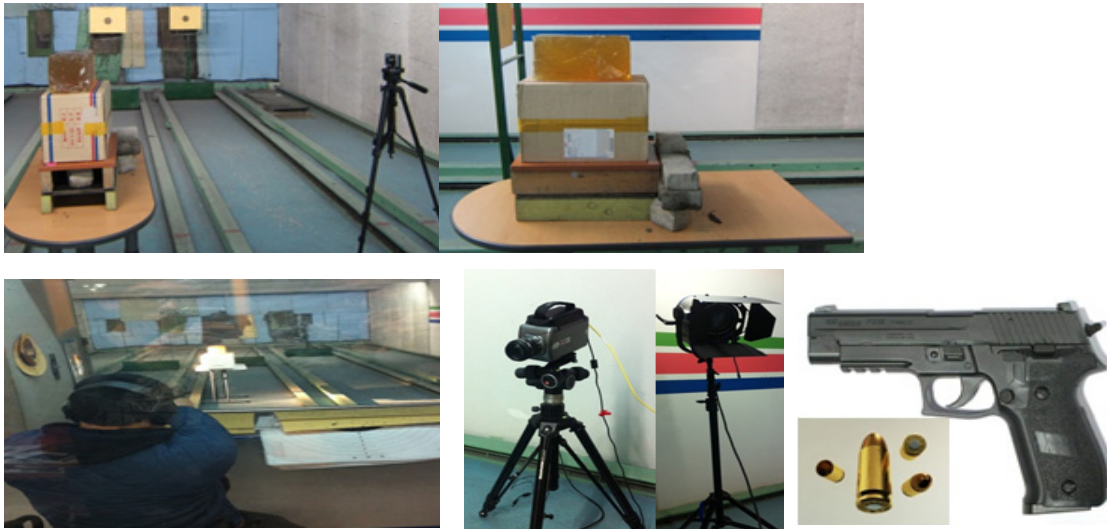


그림 1 관통 실험에 사용된 장비

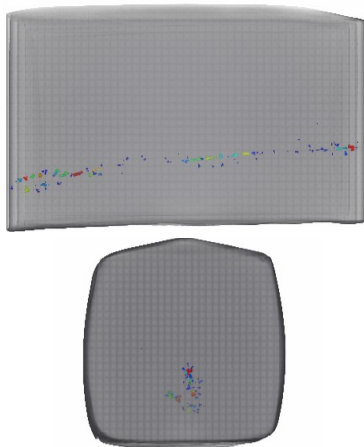


그림 2 CT촬영을 통해 제작된 카드 모델

사용된 장비는 그림 1과 같다.

또한, 젤라틴의 정확한 영구 변형량의 분석을 위해 관통 실험이 끝난 젤라틴을 공업용 CT로 촬영한 후, image processing을 거쳐서 3D 카드화를 수행하였다. 이를 통해 젤라틴의 영구 변형에 대한 심층적인 분석이 가능해졌다 (그림 2).

3. 유한요소해석 시뮬레이션 모델

컴퓨터를 이용한 모의 실험 모델을 만들기 위해서는 모사하고자 하는 현상의 물리적 특징을 먼저 제대로 아는 것이 중요하다. 본 기사에서 다루고 있는 현상은 인체의 고속 관통으로, 앞서 언급한 것과 같이 인체의 물성, 탄두의 궤적 및 불안정성, 뼈의 관통 여부 및 파편 발생 여부 등이

이 현상의 거동을 결정짓는 주요한 인자가 된다.

앞서 언급한 실험을 유한요소해석을 통하여 재현하기 위해서는 먼저 올바른 재료모델이 필요하다. 탄두와 젤라틴 각각의 재료의 모델을 어떻게 하느냐에 따라 시뮬레이션 결과는 상이한 거동을 보인다.

실험에 사용되는 젤라틴의 경우 대표적인 점탄성 물체로 알려져 있다. 또한, 고속 관통이라는 특수 상황때문에 젤라틴과 탄두가 접촉하는 부위에서는 고속의 충격파가 발생하며, 영구적으로 파괴되는 부분 역시 존재하기 때문에 이를 추가적으로 고려할 필요가 있다. 따라서 재료 모델 중에서 점탄성, Mie-Gruneisen 상태방정식, Johnson-Cook Failure model을 적용하였다.

3.1 점탄성 (Viscoelasticity)

많은 폴리머들이 선형 탄성의 거동과 점성 유체의 거동이 혼합된 형태의 거동을 보인다. 상대적으로 낮은 온도와 하중에서는 젤라틴 같은 폴리머는 간단한 선형 탄성 구성 방정식으로 모델링이 가능하다. 하지만, 고온이거나 대변형의 경우에는 같은 재료가 점성 유체로 모델링이 되는 것을 볼 수 있다. 물론 금속 역시 고온 고속 변형 중에서는 그 물성이 변하는 성질을 보이지만, 그 경향성이 심한 것은 젤라틴과 같은 유기물질들이다. 이러한 성질을 갖는 재료를 점탄성 재료라 한다.

탄성 거동에서는 재료가 하중에 의해 변형될 때 변형에너지를 저장하고 있다가 하중이 제거되면 에너지가 풀려서 원래의 형상으로 돌아간다. 반면, 점성 유체의 경우 재료내의 역학적 에너지는 연속적으로 소산되며, 저장되지 않는

다. 점탄성 물체는 그 중간쯤의 거동으로, 소산되는 에너지가 존재하므로 영구변형이 발생한다. 점탄성 재료를 해석적으로 모델링하기 위한 방법은 여러 가지가 존재하는데, 가장 근본적이면서 유명한 두 가지의 모델이 Kelvin solid model과 Maxwell fluid model이다.²⁾

$$\text{Kelvin solid model : } \sigma_{deviatoric} = \left(G + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \epsilon_{deviatoric}$$

Maxwell fluid model :

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\eta/G} \right) \sigma_{deviatoric} = \left(G \frac{\partial}{\partial t} \right) \epsilon_{deviatoric}$$

3.2 상태방정식(Equation of States, EOS)

상태방정식은 재료의 체적변화를 예측하기 위한 방정식이다. 재료에 작용하는 응력에서 편차응력을 제외한 상태의 응력을 정수압응력이라 하며, 마찬가지로 변형률 텐서의 대각합에 해당하는 변형률이 체적 변형률이다. 편차응력이 존재하지 않는 경우, 특히 기체나 유체의 경우 정수압력이 오로지 온도와 밀도의 함수로 나타나는 것을 볼 수 있는데, 상태방정식은 기본적으로 이때의 압력과 밀도, 온도의 관계를 예측하기 위해 만들어졌다.

고체 재료가 고속 변형 중에 있을 때 정수압응력과 내부 에너지의 관계를 예측하는 것도 상태방정식의 기본적인 아이디어에서 출발한다. 젤라틴이 고속으로 변형할 때 변형점에서부터 충격파가 발생을 하게 되고, 그 충격파가 전달될 때의 거동을 표현하기 위한 방법으로 정수압응력과 내부에너지, 체적변형률의 관계를 나타내는 상태방정식이 사용되는 것이다.

본 연구에서 사용한 상태방정식은 고속 충격에서의 충격파 전달을 모델링한 Mie-Gruneisen 상태방정식이다.^{1,5)} 충격파가 전달되는 과정의 모식도는 그림 3과 같다. 여기서 p , ρ , e , v 는 각각 압력, 밀도, 비에너지, 속도를 나타내며, 첨자 0은 충격파 도달 전 매질에서의 값을, 첨자 1은 충격파가 지나간 후의 매질에서의 값을 나타내며, 첨자 s는 충격파 계면에서의 값을 나타낸다.

$$v_s = c_0 + S v_1$$

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{c_0 + S u_1}{c_0 + u_1 (S-1)}, p_1 = \rho_0 c_0^2 \frac{\eta}{(1-S\eta)^2}$$

$$e_1 = e_0 + \frac{\eta}{\rho_0} p_1 - \frac{\eta^2}{2} \frac{c_0^2}{(1-S\eta)^2}$$

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$$

$$p(V, e) = p_H - \Gamma p (e - e_H)$$

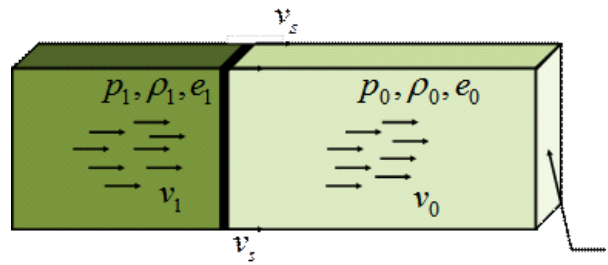


그림 3 충격이 발생했을 때의 충격파 전파과정 모식도

$$\Gamma = V \frac{\partial p}{\partial e} \Big|_V \quad (V: \text{Volume})$$

$$p_H = p_0 + \rho_0 c_0^2 \frac{\eta}{(1-S\eta)^2}, \quad e_H = e_0 + \frac{\eta}{\rho_0} p_H - \frac{\eta^2}{2} \frac{c_0^2}{(1-S\eta)^2}$$

3.3 Johnson-Cook Failure Model

앞서 언급한 대로 거의 모든 재료는 변형률 속도에 의존하는 관계를 가지고 있다. 이는 파단강도 역시 마찬가지인데, 고속 변형이 발생하는 경우에는 이를 필히 고려해야 한다.

재료의 고속 변형 시에 발생하는 재료 거동의 변형률 의존성과 온도 의존성에 대한 관계식으로 가장 널리 사용되고 있는 모델이 Johnson-Cook model이다. 이는 Strength 모델과 Failure 모델로 분류할 수 있는데, Strength model은 고속 변형하는 금속의 기울기 강성(Tangent modulus)에 대한 관계식이며, Failure model은 파단점의 변형률에 대한 관계식이다. 본 연구에서는 앞서 젤라틴의 거동 모델로 점탄성 모델을 사용하였기 때문에 Johnson-Cook Strength model은 사용하지 않고, 파단점을 정하기 위해 Johnson-Cook Failure model을 적용하였다. Johnson-Cook Failure model은 다음의 관계식으로 나타난다.⁷⁾

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon^f}$$

$$\epsilon^f = [D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}] [1 + D_4 \ln|\dot{\epsilon}^*|] [1 + D_5 T^*]$$

여기서, ϵ^f 는 파단점에서의 변형률을 나타내며, σ^* , $\dot{\epsilon}^*$, T^* 는 각각 normalized된 응력, 변형률속도, 온도를 나타낸다. 또, $D_1 \sim D_5$ 는 비례상수이다.

4. 물성치 측정 및 예측을 위한 실험

해석을 위한 재료 모델을 선정한 후에는 그에 맞는 물성치를 대입하는 과정이 필요하다. 물성치를 찾기 위한 방법으로 각 모델의 특징을 찾아낼 수 있는 실험을 통하여 물

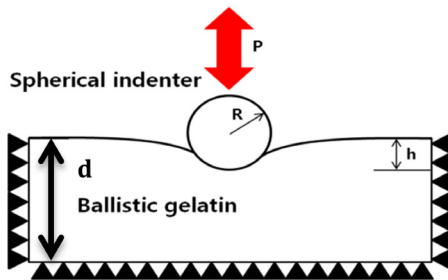


그림 4 Spherical indentation test의 모식도

성치를 얻어내거나 선행연구에서 찾아낸 값을 이용한다. 현재 젤라틴의 모사를 위해 사용되는 모델은 선형 점탄성, Mie-Gruneisen 상태방정식, Johnson-Cook Failure model의 3 종류이다. 각각의 모델의 물성치를 측정하는 방법은 다음과 같다.

- 점탄성 : Spherical indentation test
- Mie Gruneisen 상태방정식 : 탄성과 측정
- Johnson Cook Failure model : Hopkinson bar test, Taylor bar test

우리 연구단은 점탄성 물성치 획득을 위하여 Spherical indentation test를 적용하였다. Spherical indentation test는 점탄성 재료의 Stress relaxation 거동을 측정하여 점탄성 물성치를 간접적으로 얻어내기 위한 방법이다.⁴⁾ 이 방법에서는 Herzian contact theory의 해석적 해를 탄성에서가 아닌 점탄성일 때의 경우로 풀어낸 뒤 이를 재료 모델 구성 및 물성치 측정에 이용한다. 우리 연구단은 실험은 로드 셀이 연결된 볼 형태의 인덴터를 상대적으로 큰 시편에 누른 상태로 고정된 뒤에 몇 분~몇 시간 동안 로드 셀에 걸리는 하중을 측정하는 방식으로 진행하였다(그림 4, 그림 5 참조).

5. 관통실험 시뮬레이션 검증

결정한 물성치와 유한요소 모델을 바탕으로 젤라틴 관통 실험에 대한 상황을 시뮬레이션하였고 실제 실험과 비교하여 유사성을 검증하였다. 초기 탄환의 속도는 345m/s로 정하였으며, 문헌을 참조하여 초기 각속도는 8600rad/s로 정하였다. 관통실험은 순수 젤라틴 블록과 소뿔이 포함된 젤라틴 블록 두 가지로 진행하였다. 순수 젤라틴 블록 실험의 경우 고속카메라를 분석한 결과 여러 시험 환경 제약때문에 탄환이 비스듬하게 접근하는 것을 발견하여 프레임 분석을 통하여 탄환의 진입각을 알아내었고 이를 수치 모델링에 적용하였다(그림 6 참조). 수치 해석을 수행한 결과

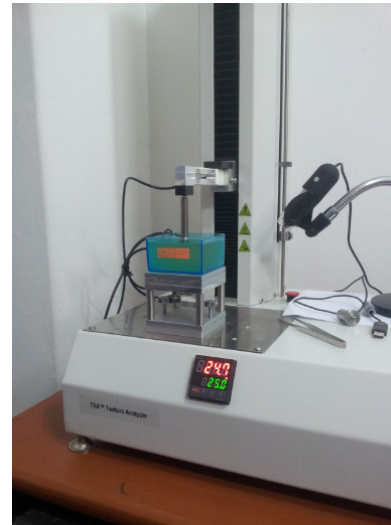


그림 5 Indentation test 장비와 시편

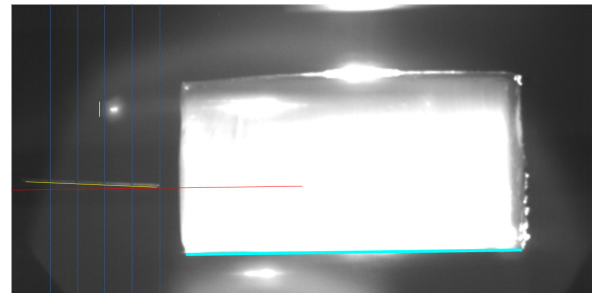


그림 6 프레임 분석을 통한 탄환의 진입각 측정

실제 실험과 매우 유사한 거동을 얻는데 성공하였다. 탄환 관통시에 발생하는 Temporary cavity의 평균 지름이 일치하고 관통시간 대비 Maximum temporary cavity 발생 시간 비율이 일치하는 것 역시 확인하였다. 탄환의 궤도 역시 동일한 궤적을 지나갔고 탄환이 저항에 의해 불안정성이 증가하여 나타나는 현상인 Yawing 역시 관찰 가능함을 볼 수 있었다(그림 7).

6. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 유사인체로 많이 사용되는 젤라틴에 고속 충격이 발생했을 시의 상황을 시뮬레이션하기 위하여 실제 탄환 관통시의 거동을 실험과 시뮬레이션의 두 가지 방법을 통하여 분석하였다. 이를 위하여 높은 FPS의 고속카메라를 이용한 프레임 분석으로 관통 발생시의 세부적인 거동에 대한 관찰 및 정량화에 성공하였다. 공업용 CT 촬영을 통한 관통된 젤라틴 블록 형상의 3D 캐드 모델화를 수행하여 탄환 관통에 의해 발생된 영구 변형에 대한 심층적인 분석을 수행하였다.

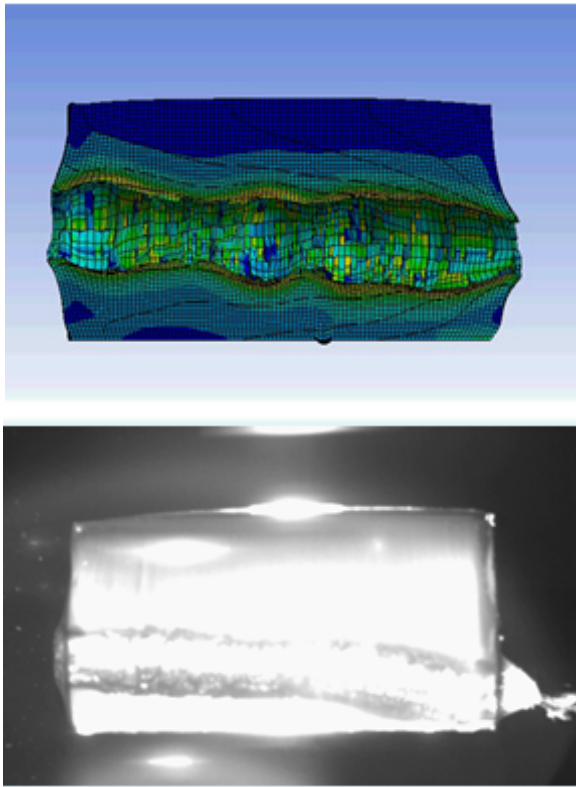


그림 7 젤라틴 블록 관통시험 시뮬레이션 결과 및 실험결과

관통 현상을 전산 모델로 구현하기 위해 유한요소해석을 이용하였다. 이 과정에서 젤라틴과 탄환에 대하여 관통 현상을 가장 유사하게 모사할 수 있는 재료의 구성 모델이 필요하였다. 젤라틴의 기본 성질을 점탄성이라 가정하고, 고속 충격시 발생하는 충격파의 전달에 대하여 모델링하기 위하여 Mie-Gruneisen 상태방정식을 적용하였고 파괴 모델로 Johnson-Cook Failure Model을 이용하였다. 각각의 세부적인 물성치는 실험 환경이 열악한 관계로 상당 부분 선행 연구를 참조하였고 젤라틴의 지배적인 물성인 점탄성 특성의 경우에는 직접 Indentation test를 통하여 물성치를 측정하였다. 해석을 통하여 충돌 현상에서의 주요 인자인 Temporary cavity와 Permanent cavity 등의 현상이 제대로 전산해석을 통해 구현됨을 확인하였다. 추가로 본 연구단은 젤라틴 블록 내부에 뼈를 추가하는 실험이 수행하였고 뼈를 통과한 탄환의 거동과, 뼈와 주변 젤라틴에 전해지는 변형에 대한 거동 역시 실험으로 검증하는데 성공하였다.

향후 젤라틴의 공정 설계를 통하여 점탄성 뿐만 아닌 다른 세부적인 물성치에 대해서도 검증 및 실험을 통하여 제어 가능하게 함으로써 보다 정확한 모의 인체를 만들기 위한 연구를 수행할 것이며, 이를 위한 측정기술에 대한 연구 역시 수행할 것이다.

참 고 문 헌

1. Hiermaier, Stefan. Structures under crash and impact: continuum mechanics, discretization and experimental characterization. Springer, (2008).
2. Mase, G. Thomas, and George E. Mase. Continuum mechanics for engineers. Crc Press, (2010).
3. D. S. Cronin, C. Falzon, "Characterization of 10% Ballistic Gelatin to Evaluate Temperature, Aging and Strain Rate Effects", Experimental Mechanics, 51, pp.1197-1206, (2011).
4. Oyen, Michelle L. "Spherical indentation creep following ramp loading." MRS Proceedings, 841. Cambridge University Press, (2004).
5. Huang, Yolin. "Gelatin Equation of State Characterization Progress." (2009).
6. Qiang, Bo, et al. "Estimating material elasticity by spherical indentation load-relaxation tests on viscoelastic samples of finite thickness." Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on 58.7: 1418-1429. (2011).
7. Johnson, Gordon R., and William H. Cook. "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures." Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 21, The Hague, Netherlands: International Ballistics Committee, (1983).
8. Preece, Dale S., Vanessa S. Berg, and Loyd R. Payne. "Bullet Impact on Steel and Kevlar ■/Steel Armor-Experimental Data and Hydrocode Modeling with Eulerian and Lagrangian Methods." 22nd International symposium on ballistics. (2005).



[담당 : 윤길호 편집위원]