

# Yaw 를 가진 긴 관통자와 경사판재의 고속충돌 수치해석

유 요 한\*

(2001년 12월 11일 접수, 2002년 4월 8일 심사완료)

## Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impacts of Yawed Long Rod Projectile Against Thin-Plate

Yo-Han Yoo

**Key Words :** Numerical Simulation(수치 시뮬레이션), Long Rod Projectile(긴 관통자), Oblique Impact(경사충돌), Yaw Angle(요 각도)

### Abstract

Using the Lagrangian explicit time-integration finite element code NET3D which can treat three-dimensional high-velocity impact problems, oblique penetration processes of long rod projectile with yaw against thin plate are simulated. Through the comparison of simulation result with experimental result and other code's computational result, the adaptability and accuracy of NET3D is evaluated under the complex situation in which yaw angle and oblique angle exist simultaneously. Main research contents to be handled in this paper include the followings. First, the accuracy and efficiency estimation of NET3D code result obtained from the oblique penetration simulations of long rod projectile with yaw against thin plate. Second, the effect of increasing impact velocity. Third, the effect of initial yaw for the spaced-plate target. Residual velocities, residual lengths, angular velocities, and final deformed configurations obtained from the NET3D computations are compared with the experimental results and other code's computational results such as Eulerian code MESA and Lagrangian code EPIC. As a result of comparisons, it has been found that NET3D code is superior to EPIC code and MESA code in the prediction capability of residual velocity and residual length of penetrator. The key features obtained from the experiment can be successfully reproduced through NET3D simulations. Throughout the study, the applicability and accuracy of NET3D as a metallic armor system design tool is verified.

### 1. 서 론

고속 비행하는 금속과 금속, 금속과 비금속 재료간의 충돌 및 파괴현상 연구를 위한 실험을 수행할 때 탄자의 운동 방향과 탄자의 자세가 일치하지 않는 요(yaw) 현상이 많이 관측된다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 작은 요 각도에서는 대부분 충돌거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 긴 관통자의 경우 작은 요 각도에서도 요에 의한 불안정 발생 가능성이 크며 이 때 충돌에 의한 관

통거동이 달라진다. 요 각도에 따라 관통자 전면의 압력분포가 달라지고 이것이 관통경로에 영향을 주어 표적의 유효두께를 변화시킨다. 요 현상은 관통 효율에 큰 영향을 미치므로 많은 실험적, 해석적 연구가 수행되어 왔으나 최근에는 실험을 통한 관측 및 분석의 어려움 때문에 수치해석연구가 비교적 활발하다.

Fig. 1 은 요와 피치(pitch) 그리고 충돌 경사각(obliquity)의 정의를 나타내고 있다.<sup>(1)</sup> Fig. 1 에서  $\alpha'$  는 요,  $\alpha''$  는 피치 그리고  $\theta$  는 충돌 경사각을 나타낸다. 전체 요(total yaw)  $\alpha$  는 다음 식으로 표시된다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \tan^2 \alpha' + \tan^2 \alpha'' \right)^{1/2} \quad (1)$$

강외 탄도학(exterior ballistics)에서는 피치(상하

\* 회원, 국방과학연구소, 제1체계개발본부  
E-mail : yyh1986@add.re.kr  
TEL : (042)821-4629 FAX : (042)821-2221

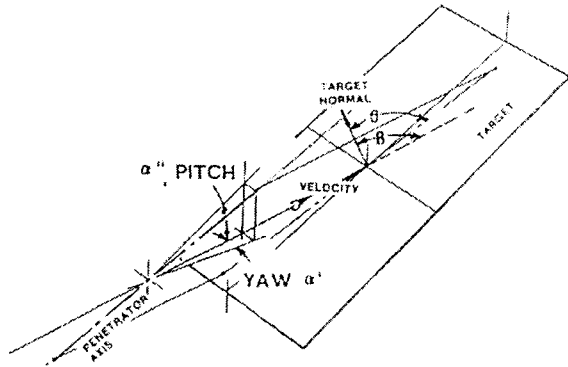


Fig. 1 Definition of yaw, pitch and obliquity<sup>(1)</sup>

방향)와 요(좌우 방향)를 구분하지만 종말 탄도학 (terminal ballistics)에서는 보통 피치와 요를 모두 포함하여 요라고 부른다.

요가 있는 탄자와 수직 표적의 충돌현상은 요가 없는 탄자와 경사표적의 충돌현상과 유사한 거동을 나타낸다. 요가 있는 긴 관통자의 수직 충돌 현상은 Bjerke 등<sup>(5)</sup>에 의하여 심층적으로 연구되어 잘 알려져 있다. 그러나 요를 가진 긴 관통자와 경사 표적의 충돌문제는 실험과 해석의 어려움 때문에 연구결과가 많이 발표되어 있지 않다.

본 논문에서는 3 차원 고속충돌 및 파괴 해석이 가능한 라그랑지안(Lagrangian) 기반의 유한요소 프로그램 NET3D<sup>(4,5)</sup>를 사용하여 요를 가진 긴 관통자와 경사 표적의 충돌문제를 해석 한 후 관통할 때 발생하는 변형 거동 및 특성을 기존의 실험 결과<sup>(6)</sup>와 비교하여 요 각도와 경사각이 동시에 존재하는 복합 문제에 대한 NET3D 의 적용성 및 신뢰성을 평가하고 다른 충돌해석전용코드 - 라그랑지안 코드인 EPIC<sup>(7)</sup>과 오일러리안(Eulerian) 코드인 MESA<sup>(8)</sup> - 의 해석결과와 비교하여 차이점을 분석해 보고자 한다. 본 논문에서 다루어질 주요 세부연구내용은 (1) 요를 가진 관통자와 경사 판재 사이의 충돌 결과 얻어진 해석 결과의 정확성 평가, (2) 충돌 속도 증가에 따른 영향 분석, (3) 요 각도 변화가 최종 유격 판재 표적에 미치는 영향 등이다.

논문의 구성은 다음과 같이 이루어진다. 수치해석에 사용된 NET3D 프로그램의 수식화 및 구성요소기술의 개요를 2 장에서 설명하고 3 장에서는 요가 있는 탄자와 경사 표적의 충돌문제의 유한요소 모델링과 재료물성의 모델링 과정을 다룬다. 4 장은 요 각도와 속도의 영향, 전면과 후면 판재 사이의 유격 효과(space effect)의 영향 등에 대한 수치해석 결과 및 분석, 그리고 시험 및 다른 충돌해석전용코드와의 비교 등으로 이루어진다. 마

지막으로 5 장에 결론이 위치한다.

## 2. 수치해석 프로그램

### 2.1 유한요소 수식화

3 차원 동적 해석을 위하여 4 절점 4 면체 요소 대신 8 절점 6 면체 요소를 사용하는 경우 몇가지 단점이 있는 것으로 알려져 있다. 첫째, 비압축 상태에서 재료의 대변형시 체적잠김(volumetric locking)을 피하기 위해 1 점 적분 방법을 사용하게 되는데 이 때 동반되는 모래시계 모드를 제어하여 요소의 거동을 안정화 시키야 한다. 둘째, 하나의 면을 이루는 4 개의 절점이 한 평면 위에 있지 못하기 때문에 접촉력 처리에 어려움이 발생된다. 셋째, 6 면체 요소는 요소망 자동 생성이 곤란하여 복잡한 3 차원 형상의 모델링이 어렵다. 4 절점 4 면체 요소를 사용하면 이상의 문제점을 해소할 수 있으므로 4 면체 요소를 사용한 3 차원 해석 코드를 개발하려는 노력이 계속되고 있다.

본 논문에서는 4 면체 요소의 표준 수식화 과정에 따른 체적잠김현상을 회피하기 위하여 압력을 독립 변수로 처리한 Zienkiewicz 의 속도-압력 혼합정식(velocity-pressure mixed formulation)화 방법<sup>(9)</sup>을 사용하였다.

밀도 변화가 작고 bulk modulus K 가 일정할 때 탄소성 재료 거동의 지배 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial t} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

여기서  $\tau_{ij}$  는 편차응력(deviatoric stress), p 는 압력이며 c 는 음속(sound speed)이며 다음식으로 표시된다.

$$c^2 = \frac{K}{\rho_0} \quad (4)$$

식 (2)와 식 (3)은 각각 i 방향의 운동량 보존 방정식(momentum conservation equation)과 질량 보존 방정식(mass conservation equation)이다. Zienkiewicz 의 속도-압력 혼합정식 방법은 operator splitting method 를 사용하여 수식을 나누어 계산하는 방법이다. operator splitting method 를 도입하여 계산할 때 먼저 식 (2)에서 세 번째 압력 항이 빠진 운동량 방정식을 이용하여 임시 중간 속도를 계산한 후 이

를 사용하여 식 (3)의 연속 방정식에서 압력을 계산한다. 그리고 마지막으로 임시 중간 속도와 식 (3)에서 계산된 압력을 식 (2)에 대입하면 최종 속도를 계산할 수 있다. 4 절점 4 면체 요소에 Zienkiewicz 가 제안한 혼합 정식을 적용하면 압력과 속도에 같은 내삽 함수를 사용한다. 이 때 사용되는 내삽 함수는 1 차 함수이기 때문에 적분점이 하나이라도 의사 모드(spurious mode)가 발생되지 않는다.

속도는 전방 차분 방법(forward difference scheme)으로 적분하고 변위는 후방 차분 방법(backward difference scheme)으로 적분하는 수정 중앙 차분 방법(modified central difference scheme)을 사용하였다. 시간중분(time step) 크기는 모든 요소들의 최대 시간중분 크기를 계산하여 그 중 가장 작은 값을 사용하였다. 4 절점 4 면체 요소를 사용하게 되면 모래시계 모드 제어와 같은 추가적인 안정화는 필요 없다. 하지만 외연적 시간 적분 해석 프로그램에서 발생할 가능성이 있는 불안정한 거동의 제어를 위하여 인공점성(artificial viscosity)을 프로그램에 적용하였다.

## 2.2 응력 속도 및 응력 갱신

구성 모델(constitutive model)의 모든 물리적인 양들은 모두 객관성(objectivity)을 가져야 하며 이를 만족시키기 위하여 구성 모델에는 응력의 물질 시간 도함수(material time derivative) 대신 객관적인 응력 속도(objective stress rate)를 사용해야 한다. NET3D 에서는 객관적인 응력 속도로 Green-Naghdi 응력 속도를 사용하였다. 극분해(polar decomposition)와 Green-Naghdi 응력 속도를 이용한 응력 갱신 알고리즘(stress update algorithm)은 Taylor 와 Flanagan<sup>(10)</sup>의 방법을 적용하였다.

## 2.3 접촉 및 요소 소진 알고리즘

접촉 처리는 크게 접촉 쌍 검색과 접촉력 계산의 두 부분으로 나뉘어 진다. 접촉 쌍 검색은 검색 알고리즘인 position code 알고리즘<sup>(11)</sup>과 bucket sorting 알고리즘<sup>(12)</sup>을 적용하였고 접촉력 계산은 방어 절점 알고리즘(defense node algorithm)<sup>(12)</sup>을 적용하였다. 방어 절점 알고리즘은 penalty 방법 등 다른 접촉력 계산 알고리즘과 달리 사용자가 정해 주어야 하는 인자가 필요 없는 접촉력 계산 알고리즘이다. 방어 절점 알고리즘 적용시 접촉면이 넓고 두 물체의 밀도차이가 큰 경우에는 접촉처리가 다소 불안정해지는 경향이 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해서 Park 등<sup>(13)</sup>이 사용한 수정 방어 절점 알고리즘(modified defense node algorithm)을 NET3D 에 적용하였다. 수정 방어 절점 알고리즘

은 인접한 여러 절점이 동시에 접촉을 일으키는 경우와 접촉력의 크기의 차이가 큰 고속 충돌 해석의 경우 우수한 해석 성능을 보여 주었다.

요소 소진 알고리즘(element eroding algorithm)은 해석 도중 주어진 파괴 조건을 만족하거나 변형이 심하게 발생한 요소를 제거하는 해석 기법<sup>(14)</sup>이다. 관통 해석 등에서 심하게 변형된 요소는 시간 중분의 크기를 감소시켜 해석 시간이 증가하게 되며, 해석을 중단시키는 경우도 있으므로 심하게 변형되어 더 이상 물리적으로 영향을 주지 않는다고 생각되는 요소는 계산에서 제외시켜야 한다. 요소가 소진되면 제거된 요소의 외곽면이 없어지고 내부의 새로운 면이 외곽면이 된다. 이럴 경우 접촉력이 계산되는 면과 절점이 계속 변화하게 되므로 접촉력 처리에서 이를 고려해 주어야 한다. 요소 소진 알고리즘을 적용할 경우 요소를 소진한 후 격자재구성(remeshing)을 수행할 필요는 없다.

## 2.4 전처리 및 후처리

NET3D 의 수치해석을 수행하기 위하여 주어진 해석 영역을 유한요소로 분할하기 위한 전처리와 해석 결과의 분석을 위한 후처리 과정이 필요하다. 본 논문에서는 전처리와 후처리를 위하여 3 차원 모델러인 I-DEAS 를 사용하였다.

## 3. 수치해석

Johnson 과 Cook<sup>(7)</sup>은 자신들이 개발한 EPIC 코드의 적용성을 확인하기 위하여 경사 판재와 요를 가진 관통자의 충돌 문제를 해석하여 오일러리안 코드인 MESA 의 해석 결과<sup>(8)</sup> 및 Fugelso 등<sup>(9)</sup>의 시험결과와 비교하였다. 시험에 사용된 관통자는 무게비율로 0.75%의 티타늄을 함유한 열화(depleted) 우라늄을 사용하였고 표적은 4340 철강 판재를 사용하였다. 관통자와 표적 사이의 경사각은 65° 이고 관통자의 요 각도는 -10°, 0°, 10° 를 사용하였다. 그러나 실제 시험에서 정확하게 관통자의 요 각도를 조절하기 곤란하므로 표적 판재를 운동시키면서 경사각을 변경시켜 관통자의 요가 없는 동일 문제로 변환하여 시험을 수행하였다.

충돌 속도의 영향을 분석하기 위하여 긴 관통자의 기준 속도인 1290 m/s 외에 2580 m/s 와 5160 m/s 에 대한 해석도 수행하였다. 이 때 판재의 운동 속도는 변경되지 않아 관통자의 등가 요 각도는 충돌 속도에 반비례하여 줄어들게 된다.

### 3.1 수치해석 모델

해석에 사용된 열화(depleted) 우라늄 탄자는 지

름 7.6 mm, 길이 76.2 mm 이고 경사 철강판재는 폭 80 mm, 높이는 150 mm, 두께는 6.4 mm 를 사용하였다. 유격 철강판재는 탄자의 초기속도 백터와 수직이 되도록 놓여졌으며 판재의 폭과 높이는 경사 판재와 같고 두께는 Johnson 과 Cook 의 해석 조건<sup>(7)</sup>과 같도록 51 mm 로 잡았다. 경사 철강판재와 유격 철강판재 사이의 거리는 관통자의 통과선상에서 경사 판재의 후면으로부터 유격 판재의 전면까지의 거리가 200 mm 가 되도록 설정하였다. 경사판재와 유격판재의 재질은 모두 4340 강이다.

Fig. 2 에 요를 가진 긴 관통자의 정지 경사 판재 충돌 해석에 사용된 탄자와 표적의 형상과 속도를 나타내었다. 관통자와 표적 사이의 경사각은 65° 이고 관통자의 요 각도는 -10°, 0°, 10° 를 사용하였다. 실제 시험 및 해석에 사용된 탄자 속도 및 판재 속도, 판재의 경사각은 Fig. 2 의 오른쪽에 표시하였다. 예를 들어 -10° 의 요 각도를 가지고 1,290 m/s 의 속도로 65° 의 경사각을 가진 정지 판재에 충돌하는 문제는 요가 없이 1210 m/s 의 속도로 73.5° 의 경사각을 가진 217 m/s 의 운동 판재에 충돌하는 문제로 변환되었다.

해석에 사용된 모델은 대칭성을 고려하여 전체 모델의 절반만을 계산에 사용하였고 과도한 요소의 생성을 방지하기 위하여 충돌에 의한 변형이 미치는 범위를 고려하여 심한 변형이 발생할 것이 예상되는 탄자 전체와 표적의 관통 경로 부근에 조밀한 요소를 사용하였다. Fig. 3 은 해석에 사용된 초기 유한 요소 격자를 나타낸다. Cagliostro 등에 의한 MESA 의 해석 결과<sup>(8)</sup>와 Johnson 과 Cook<sup>(7)</sup>의 해석(이 후 EPIC A 로 표기)에 쓰인 요소와 크기가 같아지도록 사면체의 체적이 1 mm<sup>3</sup> 이

되도록 한 번의 길이를 약 2 mm 로 설정하였다. 그러나 Johnson 과 Schonhardt<sup>(15)</sup>의 해석(이 후 EPIC B 로 표기)에서는 이보다 큰 요소를 해석에 사용하였다.

탄자와 경사 철강판재, 유격 철강판재는 대칭면을 제외하고 모든 면이 자유롭게 움직일 수 있도록 모델링하였으나 유격 판재의 후면은 고정시켰다. 탄자와 경사 판재의 초기 충돌 점(initial impact point)은 경사 판재의 운동방향을 고려하여 변형형상이 판재의 중앙에 형성되도록 배치하였다.

긴 관통자와 경사 판재만으로 구성된 해석 모델의 경우 11,820 개의 4 절점 4 면체 요소와 2,979 개의 절점으로 구성되어 있다. 동일 문제에 대하여 EPIC A 해석의 경우 20,112 개, EPIC B 해석의 경우 10,368 개, MESA 해석의 경우 202,752 개의 요소를 해석에 사용하였다. 유격 판재까지 포함된 NET3D 해석 모델의 경우 59,092 개의 4 절점 사면체 요소와 12,193 개의 절점으로 구성되었다.

3.2 재료 모델링

시험에 사용된 관통자는 무게비율 0.75%의 티타늄을 함유한 열화 우라늄이고 표적은 철강판재를 사용하였다. MESA 와 EPIC 을 이용한 해석에서는 두 재료의 물성을 모두 일정 흐름 응력으로 입력하였다. 관통자는 1790 MPa, 표적은 1000 MPa 를 사용하였다. 그러나 NET3D 해석에서는 금속재료의 고속 충돌 시 정적변형에서 고려되는 변형률 경화(strain hardening) 이외에 변형률 속도 경화(strain rate hardening) 현상과 단열변형에 따른 열적 연화(thermal softening) 현상을 동시에 고려하기 위하여 JC 모델(Johnson-Cook model)<sup>(16)</sup>을 사용하였다.

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \left(1 - (T^*)^m\right) \quad (5)$$

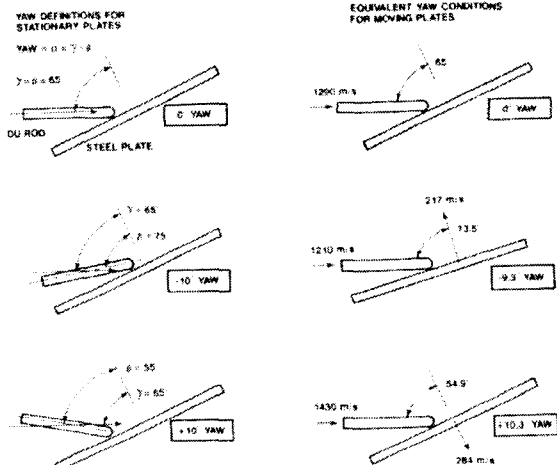


Fig. 2 Baseline yaw conditions for stationary plates and equivalent yaw conditions for moving plates<sup>(7)</sup>

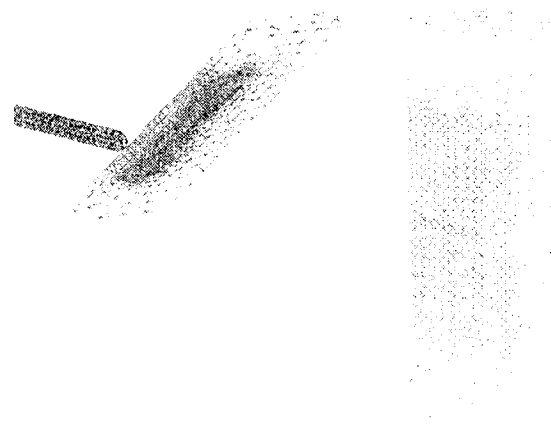


Fig. 3 Three-dimensional view of initial mesh with spaced-plate (10.3° Yaw)

여기서  $\sigma_y$  는 항복응력,  $\epsilon$  는 소성변형률,  $\dot{\epsilon}^*$  는 무차원 소성 변형률 속도(dimensionless plastic strain rate). 그리고  $T^*$  는 상용온도(homologous temperature)이며 A, B, n, C, m 은 재료 상수들이다. 상용온도는 다음과 같이 정의된다.

$$T^* = \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \quad (6)$$

여기서  $T_{ref}$  는 기준온도,  $T_{melt}$  는 재료의 융점이다.

변형에 따른 금속재료 내의 온도의 변화  $\dot{T}$  는 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{T} = \chi \xi \sigma \dot{\epsilon} \quad (7)$$

여기서  $\chi$  는 소성변형에 의한 에너지가 열로 변환되는 정도를 나타내는 값인 Taylor-Quinney 상수이고,  $\xi$  는 소성변형 에너지변화와 온도변화를 연결해 주는 물질상수 값이다.

우라늄의 물성은 Johnson 과 Cook 의 연구결과<sup>(16)</sup> 를 사용하였으며 철강관재의 물성은 4340 철강의 물성 상수 값<sup>(16)</sup>을 사용하였다.

NET3D 해석에서 금속재료의 파괴 조건은 설정하지 않고 등가 소성 변형률(equivalent plastic strain)을 이용한 요소 소진만을 계산에 고려하였다. 요소 소진 조건에 사용된 등가 소성 변형률 값은 2.0 으로 설정하였으며 소진 조건에 사용된

등가 소성 변형률 값의 변화가 변형 및 파괴특성에 큰 영향을 미치지 않는다는 기존 연구 결과<sup>(9)</sup>를 토대로 다른 등가 소성 변형률 값의 선성에 따른 영향은 분석하지 않았다.

고속 변형 중 발생된 소성변형 에너지가 열에너지로 바뀌는 비율을 나타내는 Taylor-Quinney 상수 값은 0.85 로 설정하였다. EPIC 해석에서도 파괴 조건은 설정하지 않고 1.5 의 등가 소성 변형률 값에 의한 요소 소진 조건을 해석에 사용하였다. Table 1 은 해석에 사용된 우라늄과 철강의 재료 상수를 나타낸다.

#### 4. 수치해석 결과 및 토의

##### 4.1 기준 속도의 해석결과 분석

Fig. 4, 5, 6 은 기준 속도(1290 m/s)로 충돌된 문제의 해석결과를 도시한 그림들이다. Fig. 4, 5, 6 의 (a)는 NET3D 해석 결과 얻어진 대칭 단면의 형상을 나타내고 있고 Fig. 4, 5, 6 의 (b)는 EPIC A 의

**Table 1** Material constants of uranium and steel for computations

Material constant	Material constant value	
	Uranium (0.75% Ti)	Steel
Young's Modulus (GPa)	165.6	200.1
Poisson ratio	0.3	0.3
Density(g/cm <sup>3</sup> )	18.6	7.87
A(GPa)	1.079	0.792
B(GPa)	1.12	0.510
C	0.007	0.014
n	0.25	0.26
m	1.0	1.03
T <sub>ref</sub> (°C)	10	10
T <sub>melt</sub> (°C)	1200	1536

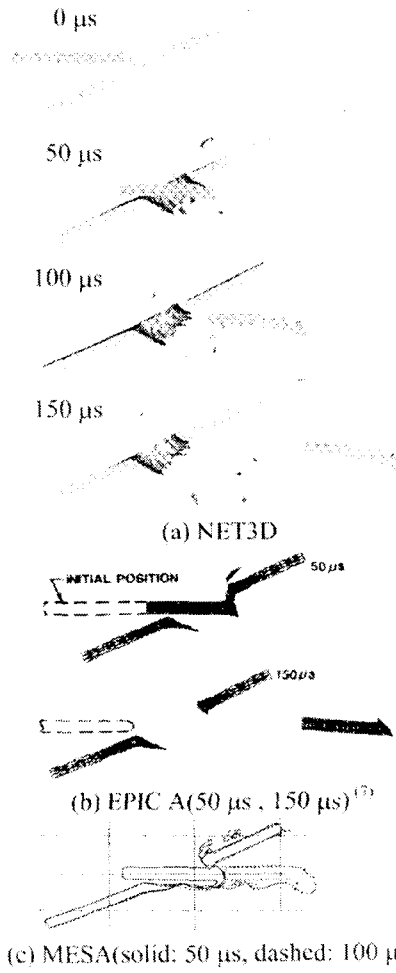


Fig. 4 Baseline computations at 0 degree initial yaw

해석 결과를 도시한 것이다. Fig. 4, 5, 6의 (b)에서 점선은 초기 형상을 실선은 변형된 형상을 나타낸다. Fig. 4, 5, 6의 (c)는 MESA의 해석 결과인데 실선은 충돌 50  $\mu$ s 후의 형상을 점선은 충돌 100  $\mu$ s 후의 형상을 나타낸다.

요가 없는 경우인 Fig. 4의 (a)와 (b)의 라그랑지안 해석결과를 살펴보면 경사관제 관통 후 탄자의 회전이 관찰된다. 이것은 기하학적 형상에 기인한 탄두 선단부의 비대칭 압력 분포로 초래되는 현상으로 경사충돌에 의한 관통 시 실험에서 항상 관찰되는 특징 중의 하나이다. 그러나 Fig. 4의 (c)를 살펴보면 MESA를 사용한 오일러리안 해석결과에서는 경사관제 관통 후 탄자의 회전을 관찰할 수 없으며 이러한 현상을 효과적으로 표현하지 못하는 것으로 보인다.

요 각도가 음인 Fig. 5의 해석결과를 살펴보면 관제가 상부로 비행하므로 탄자의 하부와 표적의 상부(Fig. 5의 점선 부분)가 긴 시간 동안 서로 접촉하는 것을 관찰할 수 있다. 관제의 관통 구멍의 지름은 요가 없는 경우와 비슷하다. 라그랑지안 해석결과에서는 탄자가 아래쪽으로 회전하는 것으로 나타났으나 오일러리안 해석결과에서는 약간 윗 쪽으로 회전하는 것으로 나타났다.

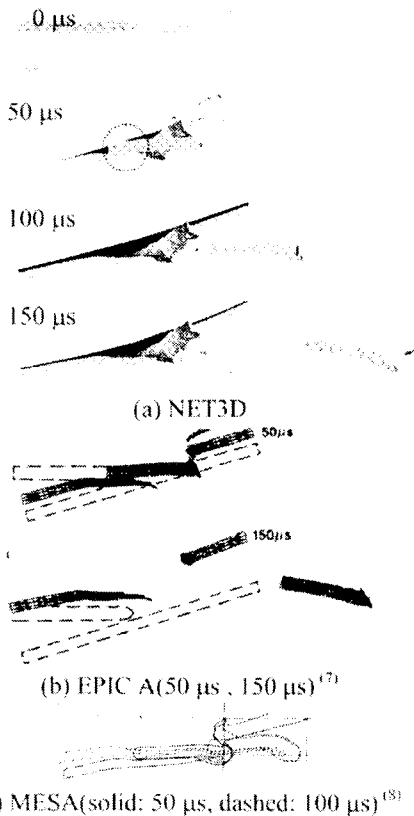


Fig. 5 Baseline computations at -9.3 degree initial yaw

요 각도가 양인 Fig. 6의 해석결과를 살펴보면 관제가 하부로 비행하므로 탄자의 상부와 표적의 하부(Fig. 6의 점선 부분)가 긴 시간 동안 서로 접촉하는 것을 관찰할 수 있다. 관제의 관통 구멍의 지름은 다른 경우에 비하여 50% 정도 큰 것으로 나타났다. NET3D의 해석결과로부터 아래쪽으로 이동하는 관제와의 지속적인 접촉에 따라 관통된 탄자의 선단부가 길게 휘어진 형상을 가지게 된다는 사실과 탄자의 회전이 크지 않다는 사실을 알 수 있다. 탄자의 선단부가 길게 휘어진 형상은 MESA의 해석결과와 일치하며 탄자의 회전이 없

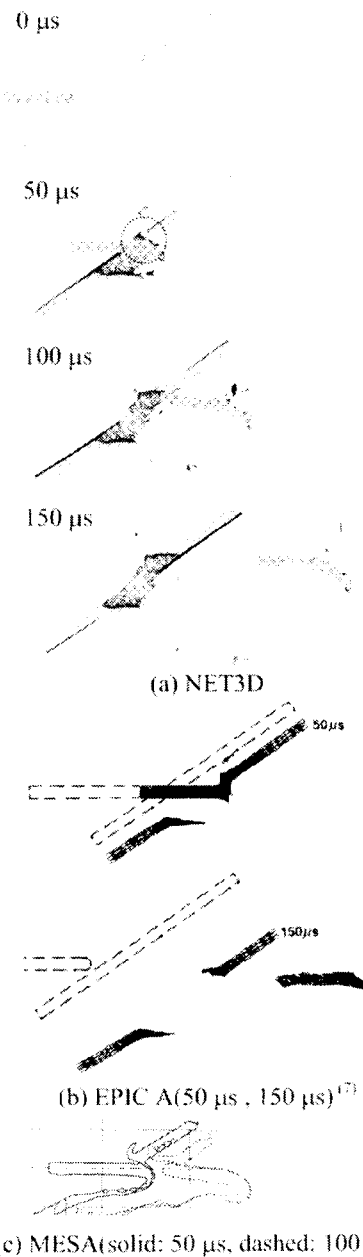
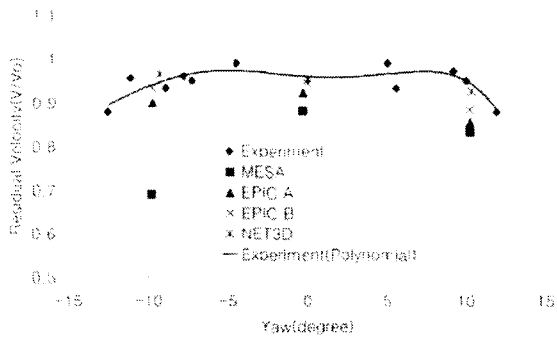


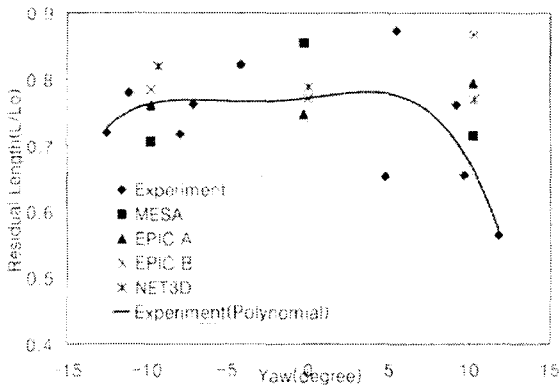
Fig. 6 Baseline computations at 10.3 degree initial yaw

는 것은 EPIC A의 결과와 일치한다.

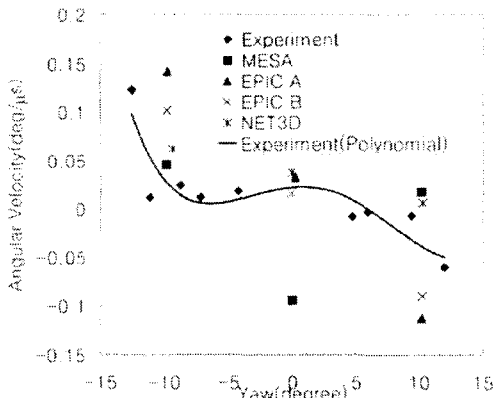
요 각도에 따른 탄자의 변형 거동을 자세히 살펴보기 위하여 잔류 속도와 잔류 탄자의 길이 그리고 각속도의 크기를 계산하여 Fig. 7의 (a), (b), (c)에 순서대로 도시하였다. 잔류 속도와 잔류 길이는 경사 판재를 관통하고 난 이후 탄자의 길이와 속도를 의미하고 탄자의 각속도는 단위 시간당



(a) Residual velocity



(b) Residual length



(c) Angular velocity

Fig. 7 Comparison of NET3D computations with EPIC, MESA computations and test data, (a) residual velocity, (b) residual length, (c) angular velocity

탄자의 회전량으로 전체 회전량을 경과 시간으로 나누면 계산할 수 있다. 잔류 속도와 잔류 탄자의 길이는 초기 값으로 나누어 무차원화시켰다. Fig. 7에 나타난 시험 결과는 데이터의 흩어짐(scattering) 현상이 심하므로 다항식에 맞춤 처리하여 실선으로 나타냈다. Fig. 7의 (a)를 보면 잔류 속도의 시험 결과와 해석 결과를 비교하고 있다. 시험결과를 5차 다항식으로 맞춤 처리한 실선과 가장 근접한 해석 결과는 NET3D와 EPIC B이며 MESA의 해석 결과가 가장 큰 차이를 보여 준다. Fig. 7의 (b)에 나타난 잔류 길이 결과를 살펴보면 NET3D 결과는 시험 결과보다 다소 높은 값을 보이며 나머지 해석 결과들도 NET3D와 비슷한 정확도를 보여주고 있다. Fig. 7의 (c)에 나타난 탄자 회전 각속도의 경우 MESA, EPIC A, EPIC B보다 NET3D의 해석결과가 시험 결과에 더욱 근접하는 것으로 나타났다.

시험 결과와 해석 결과 사이의 차이 중 일부는 마찰 및 파괴 조건의 차이에서 기인한다고 볼 수 있으나 전반적으로 NET3D의 해석 결과가 오일러 리안 코드인 MESA, 라그랑즈 코드인 EPIC A, EPIC B보다 시험 결과에 근접한 결과를 도출하였으며 정확성과 신뢰성이 높은 것으로 평가된다. EPIC A와 EPIC B 코드의 해석 결과를 살펴보면 요소 격자의 크기가 해석 결과에 크지는 않지만 약간의 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 7의 (a), (b), (c)에 나타난 결과를 종합해 볼 때 MESA 해석결과가 시험 결과와 가장 큰 차이를 보이는 것으로 판단된다.

4.2 관통자 속도 증가의 영향

요 각도에 따른 탄자의 변형 거동을 4.1 절에서 살펴보았다. 탄자의 충돌 속도에 따른 변화를 알아보기 위하여 판재의 운동 속도를 고정된 상태에서 탄자의 충돌 속도를 기준속도(1,290 m/s)의 2배, 4배로 증가시켜 계산을 수행한 후 일어난 변형 형상을 Fig. 8부터 Fig. 13 사이에 나타내었다. EPIC A를 사용한 기존의 해석 결과<sup>(7)</sup>와의 비교가 용이하도록 충돌 속도가 기준 속도의 2배인 경우 25 μs와 75 μs의 해석결과를 충돌 속도가 기준 속도의 4배인 경우 13 μs와 38 μs의 해석결과를 도시하였다. 판재의 운동 속도를 고정된 상태에서 탄자의 충돌 속도가 변화되었으므로 충돌 속도에 따라 상응하는 요 각도가 변경된다. 탄자의 충돌 속도가 기준속도의 2배일 때 요 각도는 -4.8°, +4.9°이고 기준속도의 4배일 때 요 각도는 -2.4°, +2.4°이므로 해석 결과를 분석할 때 이를 고려하여야 한다.

Fig. 4, Fig. 8 그리고 Fig. 11의 해석결과를 비교

해보면 충돌 속도가 증가할수록 표적의 관통 구멍 크기가 커지는 것으로 나타났다. 이것은 충돌 물체의 입사 에너지가 커질수록 파괴 체적이 증가된다는 실험적 결과와 일치되는 내용이다. 반면에 충돌 속도가 증가할수록 탄자의 잔류 길이는 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 현상은 NET3D 와 EPIC A 의 해석 결과에서 모두 발견된다. 또한 충돌 속도가 증가할수록 관봉자와 탄자 사이의 상호작용 시간이 감소되어 요 각도 변화에 따른 영향이 크게 줄어들고 잔류 길이, 탄도 이탈 각 등의 기하학적 형상 변화도 감소되는 것으로 관찰되었다. Fig. 8 부터 Fig. 13 사이의 결과를 살펴보면

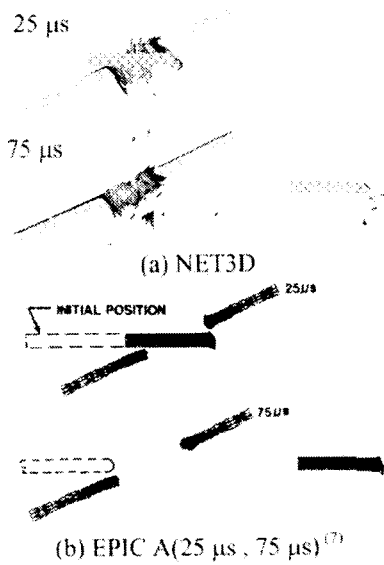


Fig. 8 NET3D computation for increased rod velocities (2Xbaseline) at 0 degree initial yaw

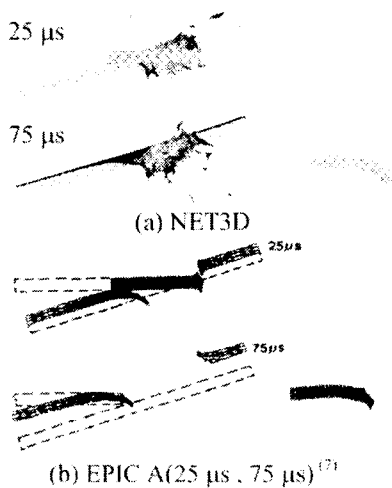


Fig. 9 NET3D computation for increased rod velocities (2Xbaseline) at -4.8 degree initial yaw

NET3D 와 EPIC A 의 해석에서 얻어진 변형 특성은 매우 유사한 것으로 평가된다.

충돌 속도 및 요 각도에 따른 잔류 속도, 잔류 길이, 탄자 회전 각속도를 Fig. 14 에 도시하였다. Fig. 14 의 (a)에서 충돌 속도가 증가할수록 초기

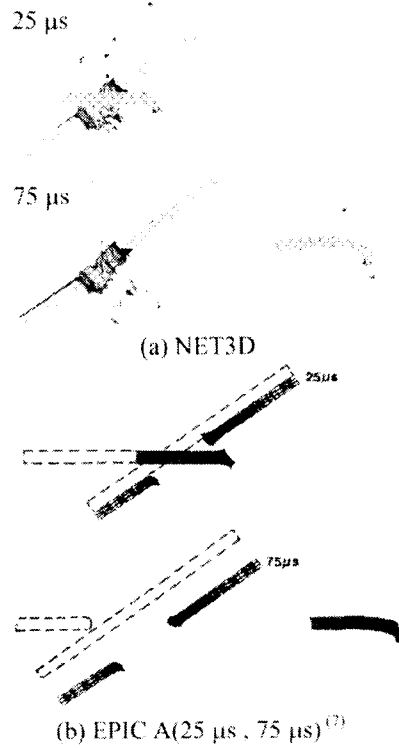


Fig. 10 NET3D computation for increased rod velocities (2Xbaseline) at +4.9 degree initial yaw

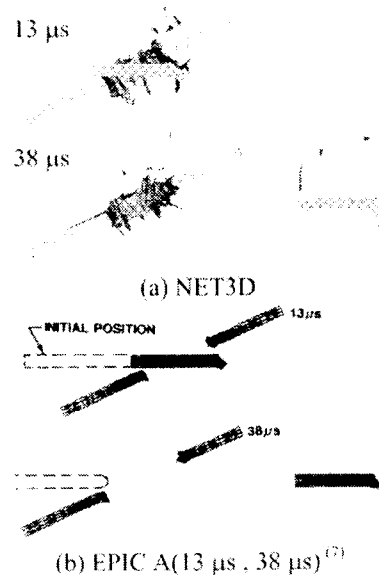


Fig. 11 NET3D computation for increased rod velocities (4Xbaseline) at 0 degree initial yaw



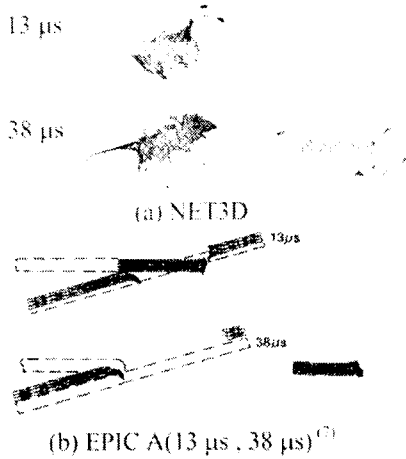


Fig. 12 NET3D computation for increased rod velocities (4Xbaseline) at -2.4 degree initial yaw

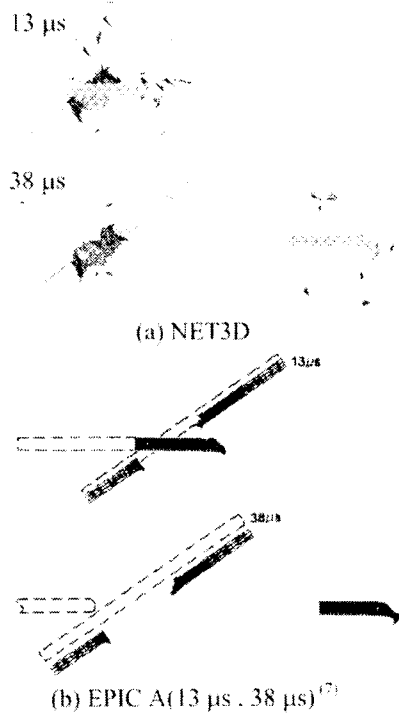
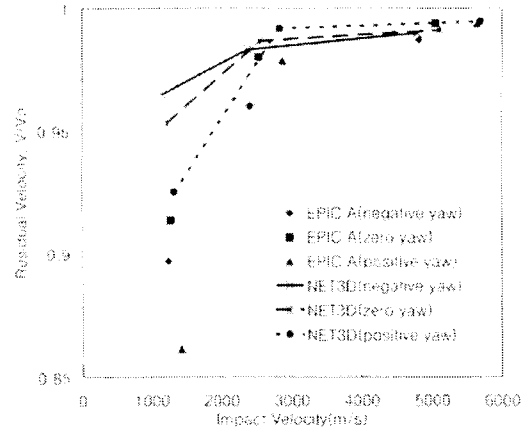
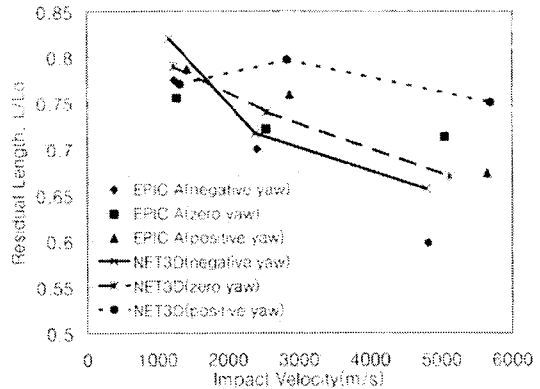


Fig. 13 NET3D computation for increased rod velocities (4Xbaseline) at +2.4 degree initial yaw

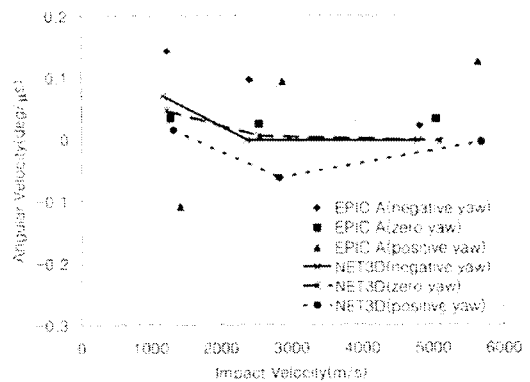
속도에 대한 잔류 속도의 비는 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 충돌 시 주어진 두개의 표적이 흡수할 수 있는 에너지에 한계가 있는 반면에 속도가 증가할수록 입력되는 운동 에너지는 속도의 제곱으로 증가되기 때문에 발생하는 현상이다. 그러나 Fig. 14의 (b)에서 탄자의 초기 길이에 대한 잔류 길이의 비는 충돌 속도의 증가에 따라 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 관찰로부터 속도가 증가함에 따라 충돌에 의하여 흡수되는 운동 에너지



(a) Residual velocity



(b) Residual length



(c) Angular velocity

Fig. 14 Comparison of NET3D computations with EPIC A computations which show the effect of rod impact velocity for the various initial yaw conditions (a) residual velocity, (b) residual length, (c) angular velocity

의 크기가 증가할 것이라는 사실을 유추할 수 있다. Fig. 14의 (c)를 살펴보면 양의 값을 가진 요 문제의 경우 EPIC A와 NET3D의 해석 결과에 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 나머지 경우는

비슷한 성향을 나타내고 있다.

Fig. 14 에 나타난 충돌 속도 및 요 각도에 따른 잔류 속도, 잔류 길이, 탄자 회전 각속도를 분석해 보면 EPIC A 와 NET3D 의 해석 결과가 일부 데이터에서 차이를 보이지만 전반적인 변화 양상은 대체로 일치하는 것으로 나타났다.

4.3 유격 판재의 효과

요 각도와 탄자 속도의 변화에 따른 탄자와 표적의 변형 거동을 좀 더 효과적으로 관찰하기 위하여 경사 판재 뒤에 공간을 두고 두꺼운 유격 판재를 설치하여 표적에 남겨진 관통 형상을 분석하였다. 기준 속도에 대한 NET3D 와 EPIC A 의 해석결과는 Fig. 15 부터 Fig. 17 사이에 나타내었고 기준의 2 배 속도에 대한 NET3D 와 EPIC A 의 해석결과는 Fig. 18 부터 Fig. 20 사이에 나타내었다.

Fig. 15 부터 Fig. 17 사이의 결과를 분석해 보면 요가 없을 때 표적의 중앙에 탄착점이 형성되고 음의 요 각도를 가지면 표적의 상단에 탄착점이 형성되고 양의 요 각도를 가지면 하단에 탄착점이 형성된다는 사실을 알 수 있는데 이러한 사실은 초기 접촉 점의 차이와 연관이 있는 것으로 보인다. 또한 음의 요 각도로부터 양의 요 각도까지 요 각도가 증가할수록 관통 길이가 증가하고 관통 구멍의 직경은 감소한다. 이 현상의 원인을 Johnson 과 Cook 은 요 각도가 작아질수록 탄자가 통과할 관통 경로 길이(penetration path length)가 증가하기 때문이라고 분석했으나 실제로 요 각도 변화에 따른 관통 경로 길이의 변화는 그다지 크지 않으므로(Fig. 18 부터 Fig. 20 까지 참조) 이보다는

탄자의 변형 및 회전에 따른 돌입 자세의 차이 때문으로 생각된다. Fig. 14 의 (a), (b)의 기준 속도 데이터로부터 요 각도가 증가함에 따라 경사 판재를 통과한 탄자의 잔류 속도와 잔류 길이는 감소하는 것으로 나타나 유격 판재의 관통 능력이 저하되어 있는 상태이므로 돌입 자세 이외의 다른 주요 원인은 찾기 어렵다.

Fig. 15 부터 Fig. 17 사이의 NET3D 와 EPIC A 해석 결과 얻어진 잔류 관통 깊이를 살펴보면 요 각도에 따른 관통 깊이 경향은 비슷하지만 절대값에서 차이를 보인다는 사실을 알 수 있다. 이것은 두 코드의 계산에 사용된 재료 모델과 상수 값의

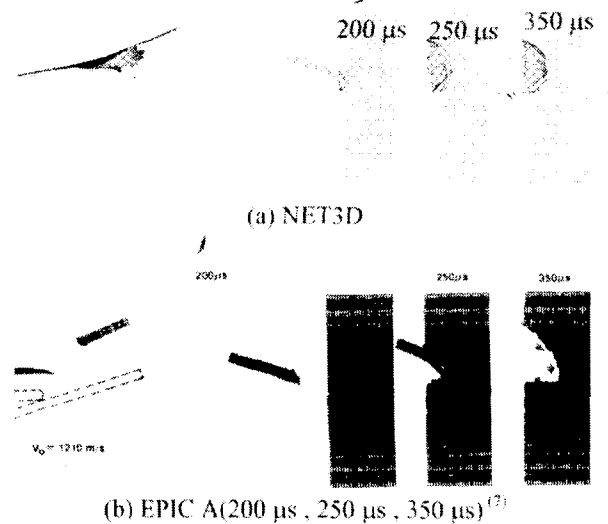


Fig. 16 Spaced-plate NET3D computations for the baseline projectile velocities at -9.3 degree initial yaw

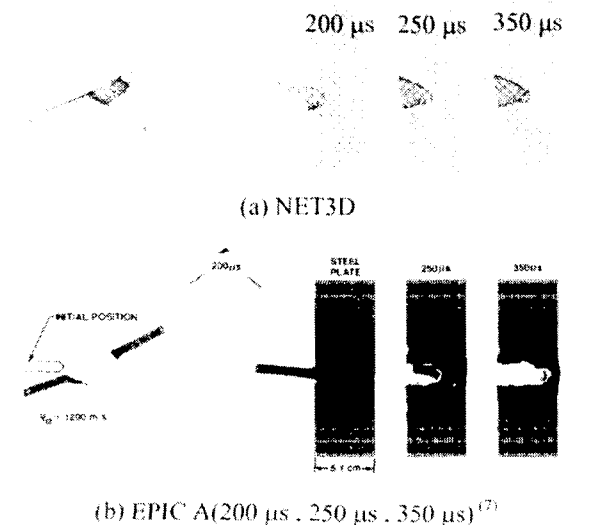


Fig. 15 Spaced-plate NET3D computations for the baseline projectile velocities at 0 degree initial yaw

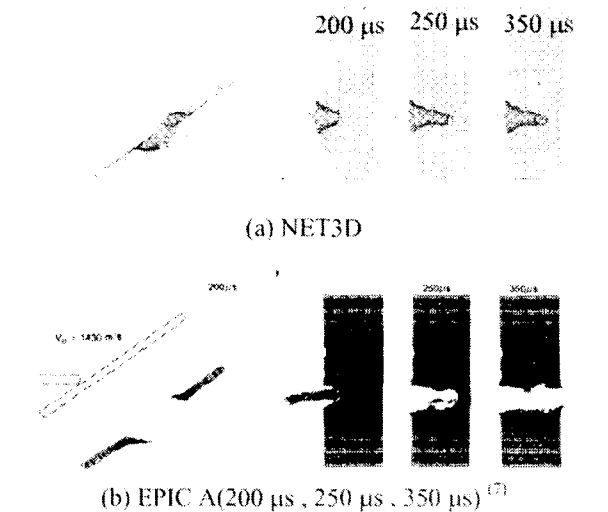


Fig. 17 Spaced-plate NET3D computations for the baseline projectile velocities at +10.3 degree initial yaw

차이때문으로 생각된다. 즉 NET3D에서는 Johnson과 Cook 모델을, EPIC A에서는 일정 흐름 응력 모델을 사용했으며 NET3D에서 평가되는 표적의 흐름 응력이 EPIC A의 흐름 응력보다 다소 높았기 때문으로 추정된다.

Fig. 18부터 Fig. 20까지의 해석 결과를 분석해보면 기준 속도의 해석 결과와 달리 요 각도와 관계없이 항상 유격 표적의 중앙에 탄착점이 형성된다는 사실을 관찰할 수 있다. 즉 충돌 속도가 빨라지면 탄자의 평균 회전 각속도가 같은 경우에도 표적에 도달하는 시간이 짧아져 전체 회전각과 속도 벡터의 변경량이 작아지므로 발생하는 현상이다. 그러나 Fig. 14의 (c)를 살펴보면 충돌 속도가

증가할수록 탄자의 회전 각속도가 감소하게 되므로 이러한 현상은 더욱 현저해지게 된다.

NET3D의 해석 결과만을 비교했을 때 음의 요 각도로부터 양의 요 각도까지 요 각도가 증가함에 따른 관통 구멍의 직경의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 EPIC A의 관통 구멍 직경은 NET3D보다 다소 크게 나타났다. 이것은 두 해석 코드 간의 요소망 분할 차이와 접촉 알고리즘의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

기준의 2배 속도 충돌시 요 각도와 관계없이 모두 관통되었다. 양의 요 각도에서 수직으로 관통되었으나 다른 두 요 각도에서는 상부쪽으로 비스듬하게 관통되었다. 이것은 변형된 탄자의 상부와 하부의 비대칭 정상 때문에 상부의 소진이 더욱 촉진되기 때문으로 생각된다.

NET3D의 해석에서 얻어진 잔류 탄자의 길이가 모든 요 각도에서 EPIC A의 결과보다 짧은 것으로 평가되었으나 최종 상태(150 μs)에서 잔류 탄자의 위치는 EPIC A와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

### 5. 결론

3차원 고속충돌 및 파괴 해석이 가능한 NET3D를 사용하여 요를 가진 긴 관통자와 경사 표적의 충돌문제를 해석한 후 관통할 때 발생하는 변형 거동 및 특성을 실험 결과 및 다른 코드의 해석결과와 비교하여 요 각도와 경사각이 동시에 존재하는 복합 문제에 대한 NET3D의 적용성 및 신뢰성을 평가하였다.

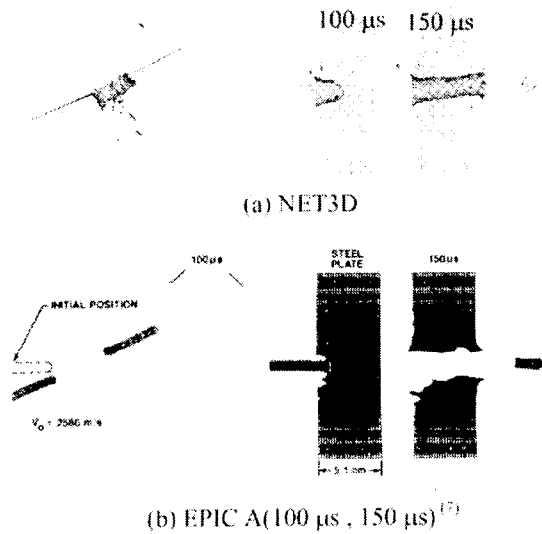


Fig. 18 Spaced-plate NET3D computations for increased velocities (2Xbaseline) at 0 degree initial yaw

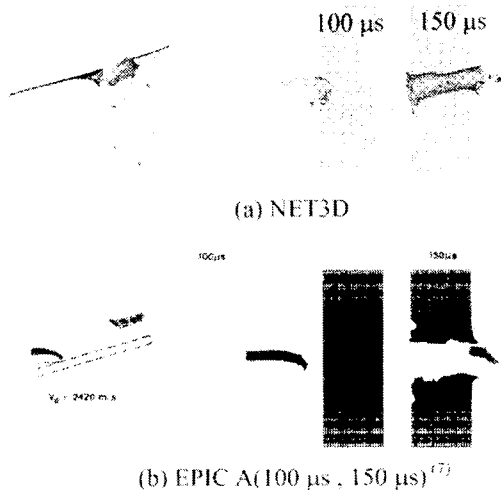


Fig. 19 Spaced-plate NET3D computations for increased velocities (2Xbaseline) at -4.8 degree initial yaw

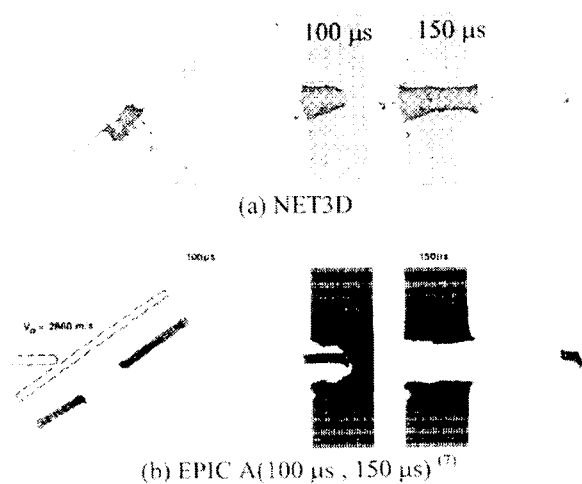


Fig. 20 Spaced-plate NET3D computations for increased velocities (2Xbaseline) at +4.9 degree initial yaw

탄자의 잔류 속도, 잔류 길이, 회전 각속도 및 최종 변형 형상에 대한 비교, 분석을 통하여 NET3D 코드의 신뢰성을 평가한 결과 라그랑지안 코드인 EPIC, 오일러리안 코드인 MESA 와 비교하여 문제 해석 능력이 동등 또는 우수한 것으로 평가되었고 시험에서 관찰되는 주요한 변형 및 관통 특성이 해석상에서 재현 가능한 것으로 나타나 운동에너지 탄자 위험에 대한 방호 구조물 설계 설계 특성 분석에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

- (1) Silsby, G. F., 1984, "Penetration of Semi-Infinite Steel Targets by Tungsten Long Rods at 1.3 to 4.5 km/s," *Proc. of 8th Int. Symp. on Ballistics*, TB/31~36.
- (2) Forrestal, M. J., Pietukowski, A. J. and Luk, V. K., 1989, "Long-Rod Penetration into Simulated Geological Targets at an Impact Velocity of 3 km/s." *Proc. of 11th Int. Symp. on Ballistics*, TB/253~262.
- (3) Bjerke, T. W., Silsby, G. F., Scheffler, D. R. and Mudd, R. M., 1993, "Yawed Long Rod Armor Penetration," *Int. J. Impact Engng.*, 14, pp. 373~383.
- (4) Yoo, Y. H. and Chung, D. T., 1991, "An Analysis of High Speed Forming Using the Explicit Time Integration Finite Element Method(I) - Effects of Friction and Inertia Force," *Transactions of the KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~10.
- (5) Yoo, Y. H., Chang, S. N. and Chung, D. T., 2001, "Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impact of Mild Steel Spheres Against Mild Steel Targets," *Transactions of the KSME*, A, Vol. 26, No. 3, pp. 576~585.
- (6) Fugelso, E. and Taylor, J. W., 1978, "Evaluation of Combined Obliquity and Yaw for U 0.75 wt% Ti Penetrators." Los Alamos Scientific Laboratory, LA-7402-MS.
- (7) Johnson, G. R. and Cook, W. H., 1993, "Lagrangian EPIC Code Computations for Oblique Yaw-Rod Impacts onto Thin Plate and Spaced Plate Targets at Various Velocities," *Int. J. Impact Engng.*, 14, pp. 373~383.
- (8) Cagliostro, D. J., Mandell, D. A., Schwalbe, L. A., Adams, T. F. and Chapyak, E. J., 1990, "MESA 3-D Calculations of Armor Penetration by Projectiles with Combined Obliquity and Yaw," *Int. J. Impact Engng.*, 10, pp. 81~92.
- (9) Zienkiewicz O. C., Rojek J., Taylor R. L. and Pastor M., 1998, "Triangles and Tetrahedral in Explicit Dynamic Codes for Solids," *Int. J. Numer. Methods Engng.* 43, pp. 565~583.
- (10) Taylor L. M. and Flanagan D. P., 1987, *PRONTO2D, A Two-Dimensional Transient Solid Dynamic Problems*, Sandia National Laboratories.
- (11) Oldenburg M. and Nilsson L., 1994, "The Position Code Algorithm for Contact Searching," *Int. J. Numer. Methods Engng.* 37, pp. 359~386.
- (12) Zhong Z. H., 1993, *Finite Element Procedures for Contact-Impact Problems*, Oxford University Press.
- (13) Park, D. W., Chung, D. T. and Oh, S. I., 1996, "Contact Treatment Method for Explicit Finite Element Code," *Proc. of KSME 1996 Fall Annual Meeting*, A.
- (14) Sewell D. A., Ong A. C. J. and Hallquist J. O., 1990, "Penetration Calculation Using an Erosion Algorithm in DYNA," *Proc. of 12th Int. Symp. on Ballistics*.
- (15) G. R. Johnson and J. A. Schonhardt, 1991, "Some Parametric Sensitivity Analyses for High Velocity Impact Computations," *Proc. of Impact III(PostSMiRT II Conference)*, Tokyo, Japan.
- (16) G. R. Johnson and W. H. Cook, 1983, "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain Rates and High Temperatures," *Proc. of 7th Int. Symp. on Ballistics*, pp. 541~547.