

## 외연 유한요소 기법을 사용한 고속충돌 및 관통해석

High Speed Impact and Penetration Analysis using Explicit Finite Element Method

백승훈\*      김승조\*\*  
Paik, Seung-Hoon      Kim, Seung-Jo

### ABSTRACT

The impact of a long-rod penetrator into oblique plates with combined obliquity and yaw is investigated. The study was done using a newly developed three dimensional dynamic and impact analysis code, which uses the explicit finite element method. Through the comparison of simulation result with experimental result and other code's result, the adaptability and accuracy of the developed code is evaluated under the complex situation in which yaw angle and oblique angle exist simultaneously. As a result of comparison, it has found that deformed shape, residual length and velocity, rotational velocity of long-rod show good agreement with experimental data. Through this study, the applicability and accuracy of the code as a metallic armour system design tool is verified.

주요기술용어(주제어) : High Velocity Impact(고속충돌), Long Rod Penetrator(긴관통자), Oblique Impact(경사충격), Explicit FEM(외연적 유한요소법)

### 1. 머리말

긴 관통자의 고속 충돌에 의한 판재의 관통현상은 매우 짧은 시간에 여러 물리적 현상이 복잡하게 얽혀 나타나는 과정이다. 시험을 통해서 가장 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 시험에 고비용이 소요되거나 때로는 시험자체가 불가능 할 때가 있고, 관통 과정 중의 자세한 각종 역학적 정보는 시험만을 통해서 알기 어려운 것들이 많다. 따라서 점점 복잡해지는 방

호구조물에 대한 관통현상의 이해를 위해, 시험과 더불어 수치해석에도 많이 활용하고 있는 추세이다.

고속 충돌 및 관통해석을 수치 모사할 수 있는 많은 상용코드들이 있으나, 새로운 재료모델이나 수치 기법의 연구 등을 위해, 미국 국립연구소등을 중심으로 한 많은 연구 그룹들이 독자 코드를 자체적으로 개발, 확보하고 있다. 본 연구팀에서도 이와 같은 목적으로 고속 충돌 시 발생하는 관통현상 및 동적 파괴 현상을 수치 모사할 수 있는 3차원 동적, 충격해석 코드인 IPSAP/Explicit(Internet Parallel Structural Analysis Program)을 개발하고 있다. 충돌해석에는 통상적으로 많은 계산시간이 소요되기 때문에, 이를 해결하기 위한 병렬화 연구도 중요한 연구 분야 중 하나이다. 개발된 코드는 현재 일부 병렬화 되어 있으며, 더욱 효율적인 병렬화 알고리즘 연구 및 여러

† 2005년 7월 1일 접수~2005년 12월 7일 게재승인

\* 서울대학교(Seoul National University) 대학원

\*\* 서울대학교, 비행체특화센터(Flight Vehicle Research Center), 교신저자

주저자 이메일 : sjkim@snu.ac.kr

수치 알고리즘과 재료 모델 테스트 등에 활용할 예정이다.

본 논문은 개발된 코드의 신뢰성을 검증하고, 향후 고속충돌 및 관통해석 분야에서의 활용가능성을 평가해 보는 것을 목적으로 한다. 이를 위해, 고속(ordnance velocity) 및 초고속(hypervelocity) 영역에서 긴 관통자와 정지 경사판재의 충돌해석, 그리고, 요(Yaw)를 가진 긴 관통자와 경사판재에 대한 충돌 문제에 대해, 기존의 시험결과 및 AUTODYN-3D, EPIC, MESA, NET3D 등과 같은 고속충돌 수치해석 코드와 비교, 평가하였다.

## 2. 수치기법

코드는 라그랑지안 방식의 비선형 연속체 역학과 외연 유한요소법에 기반을 두고, C언어로 개발되었다. 코드에 적용된 알고리즘은 다음과 같다.

### 가. 외연 유한요소법 및 시간스텝제어

운동방정식, 표면력 경계조건, 내력 연속 조건에 테스트함수  $\delta v$ 를 도입하여 현재 형상에 대해 적분한 후, 약형(weak form)을 유도하면 다음과 같은 가상 일률의 방정식이 유도된다<sup>[1,2]</sup>.

$$\int_{\Omega} \frac{\partial(\delta v_i)}{\partial x_j} \sigma_{ji} d\Omega - \int_{\Omega} \delta v_i \rho b_i d\Omega - \sum_{i=1}^3 \int_{\Gamma_i} \delta v_i \bar{t}_i d\Gamma + \int_{\Omega} \delta v_i \rho \dot{v}_i d\Omega = 0 \quad (1)$$

8절점 육면체 요소에 대해, 좌표, 변위, 속도, 가속도 등을 형상함수를 도입하여 근사하면 이산화된 운동방정식을 구할 수 있다. 체적 잠김 현상을 방지하기 위해, 1점 적분을 수행하였고, 이 때문에 발생하는 의사모드를 제어하기 위해, 아우어글래스 기법<sup>[3]</sup>을 적용하였다. 시간 스텝 n에서 이산화된 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}\mathbf{a}^n + \mathbf{F}_{int}^n = \mathbf{F}_{ext}^n \quad (2)$$

질량 행렬은 대각행렬이므로, 가속도는,

$$\mathbf{a}^n = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_{ext}^n - \mathbf{F}_{int}^n) \quad (3)$$

속도, 변위, 좌표값은 중간스텝 중앙차분법(half step central difference method)에 의해 다음과 같이 증분된다.

$$\mathbf{v}^{n+1/2} = \mathbf{v}^{n-1/2} + \mathbf{a}^n \Delta t^n \quad (4)$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \mathbf{v}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (5)$$

$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^0 + \mathbf{u}^{n+1} \quad (6)$$

중앙차분법은 조건적 안정성(conditionally stable)이 보장되는 기법기법이다. 해의 안정성을 보장하기 위해 음파가 하나의 메쉬를 지나는 시간보다 시간스텝간격을 작게 유지해야 하는 CFL 조건을 만족하도록 해야 한다. 솔리드 요소에서 임계시간간격은 인공점성 Q가 고려되면 다음과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{L_e}{[Q + (Q^2 + c^2)^{1/2}]} \quad (7)$$

$$Q = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\epsilon}_{kk}| & \text{for } \dot{\epsilon}_{kk} < 0 \\ 0 & \text{for } \dot{\epsilon}_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

여기서,  $L_e$ 는 특성길이(characteristic length),  $c$ 는 음파전달속도(sound speed),  $C_0$ ,  $C_1$ 은 인공체적점성(artificial bulk viscosity)의 계수,  $\dot{\epsilon}_{kk}$ 는 체적변형률이다.  $L_e$ 와  $c$ 는 유한요소마다 다를 수 있으므로, 모든 요소에 대해 임계시간을 계산한 후, 그 중 가장 작은 값을 사용하며, 매 스텝마다 새로 계산해야 한다.

### 나. 인공점성(Artificial Bulk Viscosity)

구조물에 충격파가 전달되는 경우, 충격파로 인한 불연속특성을 고려하고, 매우 높은 속도구배로 인해 발생하는 유한요소 거동의 안정성을 해소하기 위해,

고속충격을 다루는 거의 모든 코드에 인공체적점성이 적용되어있다. 이 방법에서는 압력 항에 다음과 같은 점성 항이 더해져서 계산된다.

$$q = \begin{cases} \rho_0 L_e (C_0 L_e \dot{\epsilon}_{kk}^2 - C_1 c \dot{\epsilon}_{kk}^2) & \text{for } \dot{\epsilon}_{kk}^2 < 0 \\ 0 & \text{for } \dot{\epsilon}_{kk}^2 \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

통상적으로  $C_0$ ,  $C_1$ 은 각각 1.5와 0.06을 사용한다.

다. 응력 갱신(Objective Stress Rate Update)

대회전이 동반되는 문제에서 구성모델(constitutive model)의 모든 물리적인 양은 거동을 기술하는 프레임에 관계없이(frame invariance) 모두 객관성(objective)을 유지해야 한다<sup>[4]</sup>. 이를 만족시키기 위해 객관적이지 않은 응력의 시간 도함수(material time derivative) 대신 객관화된 응력변화율(stress rate)를 사용해야 한다. 객관화된 응력변화율에는 Jaumann rate, Green-Naghdi rate, Truesdell rate 등이 있으며, 본 코드에서는 Jaumann rate를 적용하였다. 응력 갱신 및 내력벡터 계산 과정은 다음과 같다<sup>[2]</sup>.

각 유한요소체에 대해,

- (1) 각 절점의 속도로부터 변형률속도 및 스피넨서를 계산한다.

$$\mathbf{D}^{n+1/2}, \mathbf{W}^{n+1/2}$$

- (2) 변형률 속도를 이용하여 객관화된 응력변화율을 계산한다.

$$\boldsymbol{\sigma}^{\nabla n+1/2} = \mathbf{C}^{\text{eff}} : \mathbf{D}^{n+1/2} \quad (10)$$

- (3) 응력의 회전변화율을 구하고, 객관화된 응력변화율에 더해, 응력의 시간도함수를 구한다.

$$\boldsymbol{\sigma}^{n+1/2} = \boldsymbol{\sigma}^{\nabla n+1/2} + \boldsymbol{\sigma} \mathbf{W}^T + \mathbf{W} \boldsymbol{\sigma} \quad (11)$$

- (4) 응력 증분량을 갱신한다.

$$\boldsymbol{\sigma}^{n+1} = \boldsymbol{\sigma}^n + \boldsymbol{\sigma}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (12)$$

- (5) 응력에 의해 절점에 작용하는 내력벡터를 계산한다.

$$\mathbf{F}_{\text{int}}^c = \int_{\Omega_e} \mathbf{N}_{i,j} \boldsymbol{\sigma}^{n+1} d\Omega_e \quad (13)$$

- (6) 요소별 내력벡터를 전체내력벡터에 합한다.

$$\mathbf{F}_{\text{int}} \leftarrow \mathbf{F}_{\text{int}} + \mathbf{F}_{\text{int}}^c \quad (14)$$

라. 재료모델(Material Model)

응력증분(stress update) 시 일단 편차응력이 탄성 영역에서 일어난 것으로 가정하고 항복조건을 넘어서면, 소성성분을 보정하는 방식을 사용하였다. 탄성 가정한 응력 증분량(trial stress)  ${}^*s_{ij}^{n+1}$  는,

$${}^*s_{ij}^{n+1} = s_{ij}^n + s_{ip} W_{pj} + s_{jp} W_{pi} + 2G \dot{\epsilon}'_{ij} dt \quad (15)$$

이다. 여기서,  $s_{ij}^n$  는 편차응력,  $\dot{\epsilon}'_{ij}$  는 편차변형률 속도이다. 탄성변형 가정으로 증분된 편차응력이 다음과 같이 항복조건을 만족하는 지 체크한다.

$$\phi = \frac{1}{2} {}^*s_{ij}^{n+1} {}^*s_{ij}^{n+1} - \frac{1}{3} \sigma_Y^2 \leq 0 \quad (16)$$

항복조건이 만족되면, 탄성변형으로 응력증분은 종료되고, 만족되지 않으면 반지름 회귀법(radial mapping)을 사용하여, 항복곡면에 놓이도록 반복계산을 통해 보정하였다.

고속충돌 시 정적 변형에서 고려해야 하는 변형률 경화(strain hardening) 이외에도, 변형률속도에 따른 경화(strain rate dependant hardening) 그리고 단열 변형에 따른 열적 연화(thermal softening) 현상을 동시에 고려하기 위해, 항복조건으로 Johnson-Cook<sup>[5]</sup> 모델을 사용하였다.

$$\sigma_Y = (A + B \bar{\epsilon}^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right] \quad (17)$$

여기서,  $\sigma_Y$  는 항복응력, A는 정적 항복강도, B는 변형률 경화 상수,  $\bar{\epsilon}$  등가소성변형률, n은 변형률 경화 지수, C는 변형률 속도파라미터,  $\dot{\epsilon}$  는 등가 변형률 속도,  $\dot{\epsilon}_0$  는 기준 변형률속도, T는 온도,  $T_{ref}$  는 기준 온도,  $T_{melt}$  는 재료의 용점, 그리고 m은 온도 지수이다. 온도는 내부에너지(internal energy)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$dT = \beta \frac{dW}{\rho C_p} = \beta \frac{\bar{\sigma} d\bar{\epsilon}}{\rho C_p} \quad (18)$$

여기서,  $\beta$ 는 변형에너지가 열로 변하는 계수이고,  $C_p$ 는 잠열(heat capacity)이다.

마. 접촉처리

충돌문제에서 유한요소 계산 이외에 중요하게 다루어야 할 부분이 접촉처리 과정이다. 접촉처리과정은 전역탐색, 세부 탐색, 접촉력 계산 부분으로 나누어진다.

1) 전역탐색(global search)

전역탐색과정은 접촉여부를 확인해야 할 접촉쌍을 결정하는 과정으로, 버킷소팅(Bucket Sorting)<sup>[6]</sup> 방법을 적용하였다. 다만, 버킷의 크기는 가장 작은 접촉면의 크기를 기준으로 하였다<sup>[7]</sup>. 이 방식에서는 각 버킷에 보다 작은 개수의 슬레이브 노드가 속하게 되며, 하나의 마스터 세그먼트가 여러 개의 버킷에 걸쳐 있을 수 있다. 버킷소팅 방식을 이용한 접촉쌍 결정 순서를 간단히 요약하면 다음과 같다. (1) 마스터, 슬레이브 노드가 공간상에서 차지하는 최대, 최소 좌표값을 구한다. (2) 버킷크기를 결정하고, 각방향으로 버킷을 나눈 후, 고유 버킷번호를 부여한다. (3) 슬레이브, 마스터 노드를 각 버킷에 할당한다. 이과정이 끝나면, 어느 버킷에 어느 노드들이 들어있는지 알게 된다. 다음으로, (4) 각 마스터 세그먼트가 차지하고 있는 버킷들을 찾는다.(각방향 최대, 최소 버킷 번호) (5) 그 버킷들에 들어있는 슬레이브노드들을 취합한다. (4), (5)과정은 모든 마스터세그먼트에 대해 계산하면, 각 마스터 세그먼트는 자신과 접촉여부를 확인해야 하는 슬레이브 노드들을 알고 있게 되므로, 접촉쌍 결정과정이 끝나게 된다.

2) 접촉위치 탐색(local search)

이 과정은 각 마스터 세그먼트와, 버킷소팅을 통해 결정된 슬레이브 노드들에 대해, 접촉점탐색 및 접촉이 이루어졌는지를 확인하는 과정이다. 먼저 마스터 세그먼트 위의 접촉점을 찾는다. 접촉점은 접촉점에서의 접선벡터와 접촉점에서 슬레이브 노드를 가리키는 벡터가 수직인 점이다. 따라서 두 벡터의 내적이 0인 점이 되는데, 이 두 벡터는 접촉점의 위치에 따라 변하므로, 두 벡터의 내적은 접촉점에 대해 비선

형 방정식이 된다. 접촉점의 위치를 구하기 위해, 뉴턴-랩슨 방법을 이용하여 구하였으며, 많은 충돌해석 상용코드에서도 이 같은 방법으로 접촉점의 위치를 구하고 있다. 접촉점의 위치를 찾은 후 접촉점에서의 세그먼트의 노말 벡터를 구하고, 슬레이브 노드가 세그먼트를 침투했는 지를 확인하기 위해, 노말벡터 방향으로 접촉점과 슬레이브 노드와의 상대거리를 구한다.

3) 접촉력 계산(contact force)

슬레이브 노드가 마스터세그먼트를 침투하면, 침투하면 페널티 방법(penalty method)에 의해, 슬레이브 노드에 다음과 같은 접촉하중을 부가한다.

접촉하중의 페널티 파라미터는 세그먼트를 포함하는 요소의 체적탄성률, 부피, 접촉 면적을 고려하여 계산한다. 마스터세그먼트의 각 노드에는 이에 대응하는 반발력을 접촉점 위치의 형상함수 값을 고려하여 다음과 같이 부가한다.

4) 요소소진 및자동 접촉면 갱신

요소소진 알고리즘(element erosion algorithm) 해석 도중 변형이 심하게 발생하거나 파손조건을 만족하는 요소를 제거하는 기법이다<sup>[8]</sup>. 관통 해석등에서 심하게 변형된 요소는 시간 증분의 크기를 감소시켜 해석시간이 증가하게 되며, 해석을 중단시키는 경우도 있으므로 심하게 변형되어 더 이상 물리적으로 변형되지 않는다고 생각되는 요소는 계산에서 제외시켜야 한다. 요소가 소진되면, 제거된 요소의 외곽면이 없어지고 내부의 새로운 면이 외곽면이 된다. 이럴 경우, 접촉력이 계산되는 면과 절점은 변하게 되므로 접촉처리 시 이를 고려해주어야 한다. 여러 접촉면 자동 갱신 알고리즘 중 참고문헌 [7]의 방법을 사용하였다. 외곽면은 요소가 소진될 때마다 재구성을 하였다.

3. 긴 관통자와 경사판재의 고속 충격

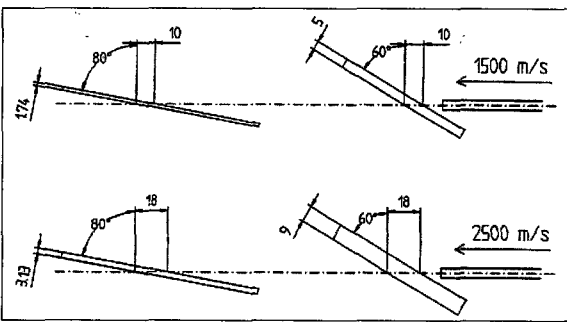
긴 관통자와 경사판재의 고속충돌 수치모사의 신뢰성평가를 위해, 기존의 시험<sup>[9]</sup> 및 동일 시험에 대한

AUTODYN-3D 및 NET3D를 이용한 해석<sup>(10,11)</sup>과 비교하였다.

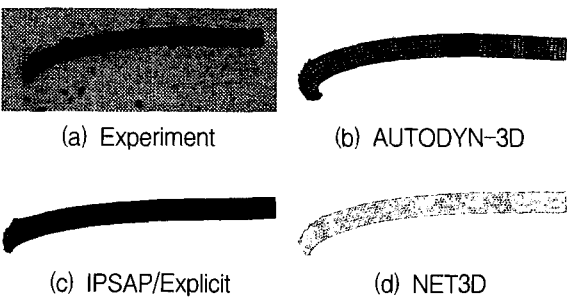
가. 유한요소 및 물성 모델

해석에 사용된 탄자는 지름 5mm, 길이 75mm이고, 강판은 폭 50mm, 길이는 경사각 60도의 경우 76mm, 경사각 80도의 경우 106mm이다. 두께는 탄속이 동일한 경우, 경사각이 변화해도 관통방향 두께가 일정하도록 판재 두께를 조절하였다. 그림 2에 탄자와 판재의 형상 및 탄속을 나타내었다. 모델은 대칭성을 고려하여 절반만 계산에 사용하였다. 재료모델은 JC모델을 사용하였으며, 사용된 재료는 경사판재의 경우 철강(SIS 2541-03), 탄자의 경우 텅스텐 중합금(DX2HCMF)이다. 물성치를 참고문헌 [10]에 나온 값을 사용하였다. 요소소진을 위한 등가 소성 변형률은 1.5로 설정하였다.

탄자의 변형형을 시험결과(Flash X-ray 사진) 및 다른 코드와의 해석결과와 비교하였다. 경사각, 판

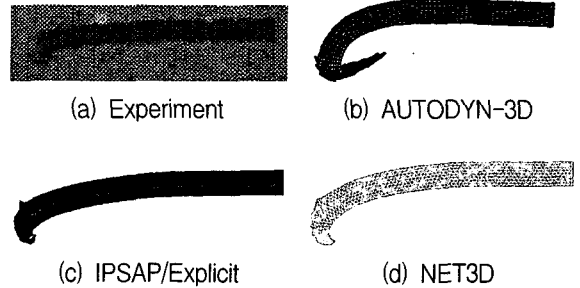


[그림 1] Model configuration<sup>(10)</sup>

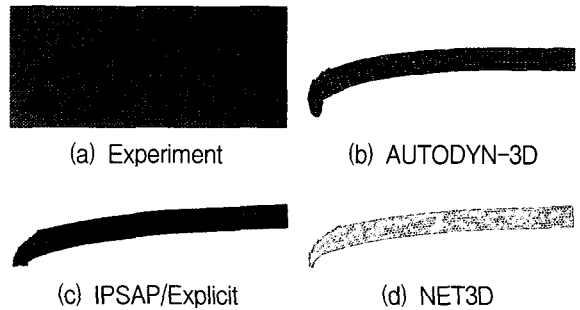


[그림 2] CASE A : Obliquity=60 deg., Plate thickness=5mm, Impact velocity=1.5km/s

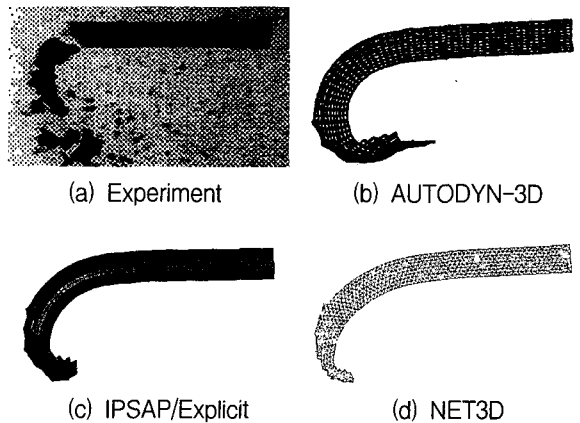
재두께, 탄속에 따른 각각의 경우(CASE A, B, C, D)를 그림 2~5에 나타내었으며, 특징적인 변형형상



[그림 3] CASE B : Obliquity=60 deg., Plate thickness=9mm, Impact velocity=2.5km/s



[그림 4] CASE C : Obliquity=80 deg., Plate thickness=1.74mm, Impact velocity=1.5km/s



[그림 5] CASE D : Obliquity=80 deg., Plate thickness=9mm, Impact velocity=2.5km/s

[표 1] Comparison of Residual Velocity

Case	잔류속도(V/Vo)			
	시험	AUTO DYN -3D	NET3D	IPSAP /Explicit
A	0.97	0.98	0.98	0.98
B	0.99	0.99	0.99	0.99
C	0.97	0.97	0.98	0.98
D	0.98	0.98	0.99	0.99

[표 2] Comparison of Residual Length

Case	잔류길이(L/Lo)			
	시험	AUTO DYN -3D	NET3D	IPSAP /Explicit
A	0.85	0.87	0.85	0.84
B	0.76	0.75	0.77	0.75
C	0.84	0.85	0.85	0.84
D	0.62	0.68	0.67	0.63

이 시험과 대체로 잘 일치하고 있다. 표 1, 2에서는 잔류속도와 잔류 길이를 비교하였다. 잔류길이와 잔류속도는 탄자가 경사판재를 빠져 나온 후 150 $\mu$ s 일때의 길이와 속도이며, 초기값을 나누어 각 각 무차원화 시켰다.

개발된 코드가 시험 결과와 잘 일치하고 있으며, 다른 코드와 비교해도 동등 또는 우수하게 결과를 예측하고 있음을 알 수 있다.

### 3. Yaw를 가진 긴 관통자와 경사판재

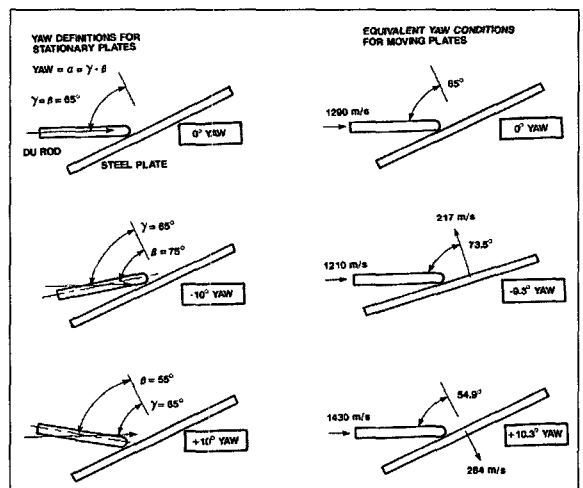
Yaw를 가진 긴 관통자의 경사판재에 대한 고속충돌해석에 대해 IPSAP/Explicit의 신뢰성을 평가하기 위해 기존의 시험 결과<sup>[12]</sup> 및 오일러리안 코드인 MESA<sup>[13]</sup>, 라그랑지안 코드인 EPIC<sup>[14]</sup>, NET3D<sup>[11]</sup>의 해석 결과와 비교하였다.

#### 가. 수치해석모델

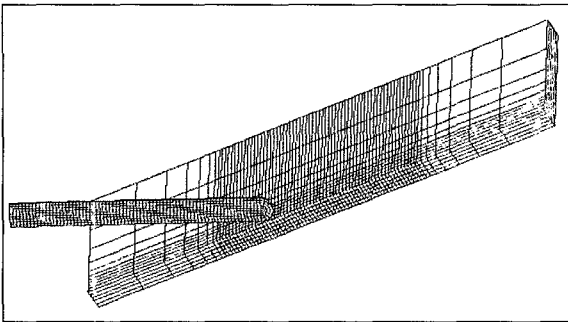
해석에 사용된 탄자는 무게비율로 0.75%의 티타늄을 함유한 열화(depleted)우라늄 탄자로, 지름 7.6mm, 길이 76.2mm이고, 경사 판재는 폭 80mm, 높이 150mm, 두께는 6.4mm이며, 재질은4340강이다. 관통자와 표적의 경사각은 65°이고 관통자의 속도는 1,290m/s, 요 각도는 -10°, 0°, 10°이다. 그러나 실제 시험에서는 정확하게 관통자의 요 각도를 조절하기 어려우므로, 표적 판재의 경사각을 변경시키고, 속도를 부여함으로써 관통자에 요가 없는 동일한 문제로 변환하여 시험을 수행하였다. 그림 6에 요를 가진 긴 관통자와 정지 경사 판재의 충돌해석에 사용된 탄자와 표적의 형상과 속도를 나타내었다. 대칭성을 고려하여 전체모델의 절반만 계산에 사용하였고, 대칭면을 이외에는 경계조건을 부여하지 않았다. 탄자와 경사판재의 초기 충돌 위치는 경사판재의 속도를 고려하여 관통이 판재의 중앙에 형성되도록 배치하였다. 그림 7은 해석에 사용된 유한요소 모델이다. 150 $\mu$ sec까지 해석을 하였다.

#### 나. 재료 모델 및 물성치

MESA와 EPIC을 이용한 해석에서는 두 재료의 물성을 모두 일정 흐름 응력으로 입력하였다. 관통자는



[그림 6] Initial yaw conditions for stationary plates and equivalent yaw conditions for moving plate<sup>[14]</sup>

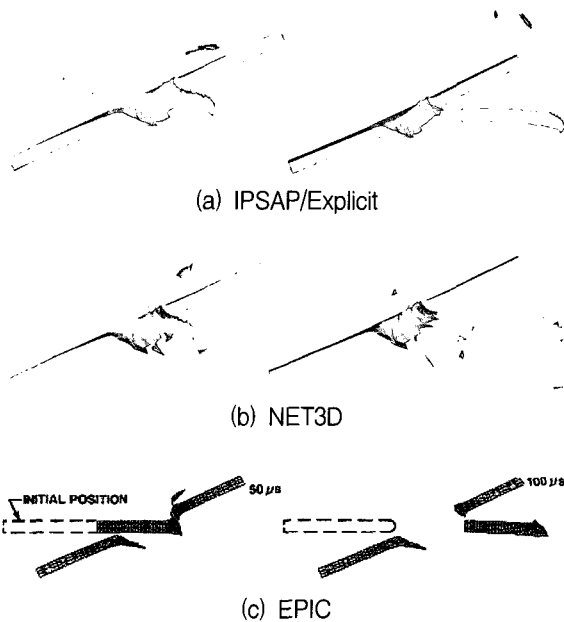


[그림 7] Initial mesh(0 degree yaw)

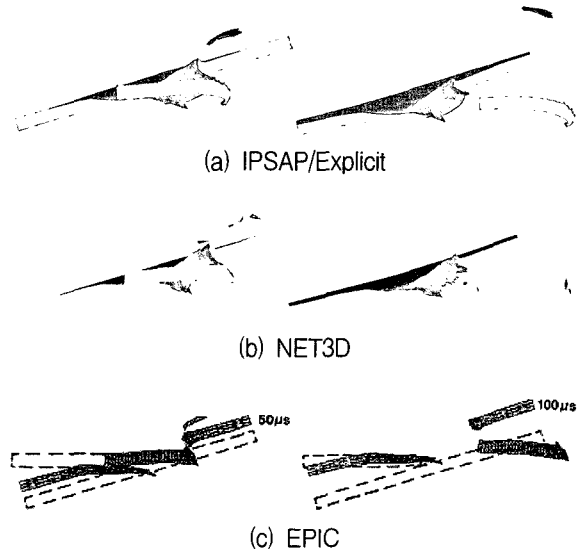
1,790MPa, 표적은 1,000Mpa를 사용하였다. NET3D에서는 JC 모델을 사용하였고, IPSAP/Explicit에서도 JC 모델을 사용하였다. 해석에 사용된 우라늄과 철강의 물성상수 값은 참고문헌의 값<sup>[5]</sup>을 이용하였다. 요소소진을 위한 등가 소성 변형률은 EPIC의 경우와 동일하게 1.5로 설정하였다.

다. 해석결과 비교

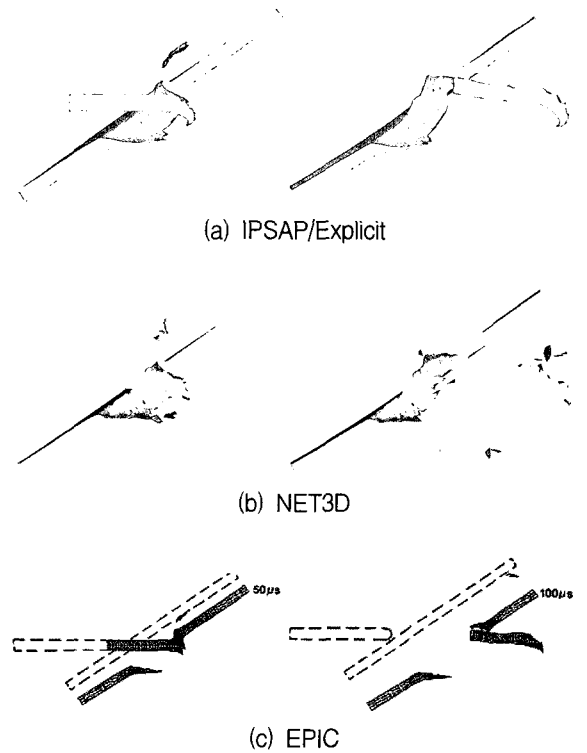
Yaw 각도 0°, -9.3°, 10.3°에 대한 IPSAP/Explicit, NET3D, EPIC의 결과를 각각 그림 8, 9, 10에 나타



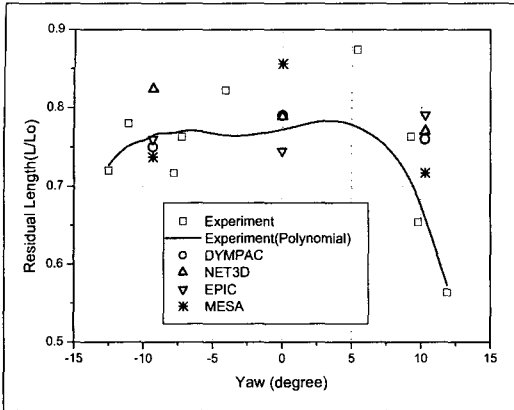
[그림 8] At 0 degree initial yaw(50μsec, 100μsec)



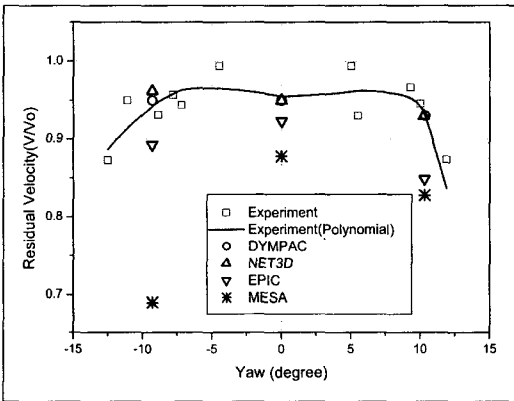
[그림 9] At -9.3 degree initial yaw(50μsec, 100μsec)



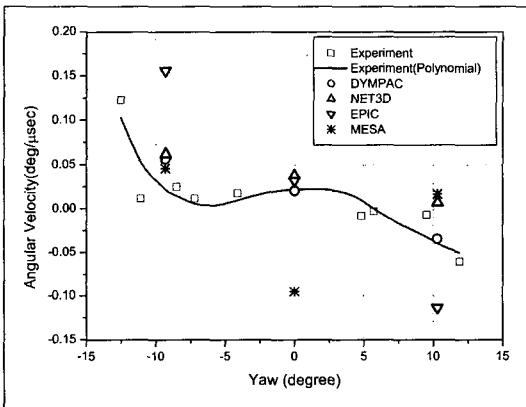
[그림 10] At 10.3 degree initial yaw (50μsec, 100μsec)



(a) Residual Length



(b) Residual Velocity



(c) Angular Velocity

[그림 11] Comparison of IPSAP/Explicit computation with Experiment and NET3D, EPIC, MESA computation

내었다. 요가 없는 경우, 관통 후 탄자의 회전이 관찰된다. 이는 경사판재에 의해 관통 시 탄두에 비대 압력분포가 가해지기 때문에 나타나는 현상으로, 경사 충돌 관통시험 시 항상 관찰되는 특징 중의 하나이다. 요가 음의 각도일 때는 판재가 상부로 비행하므로, 탄자의 하부와 판재의 상부가 서로 긴 시간 동안 접촉을 하게 되고, 요가 양의 각도일 때는 그 반대현상이 관찰된다.

요 각도에 따른 탄자의 변형거동을 자세히 살펴보기 위하여 잔류길이, 잔류속도, 각속도 등을 그림 11에 도시하였다. 탄자의 각속도는 단위시간당탄자의 회전량으로 전체 회전량을 경과시간으로 나누어 계산하였다.

시험결과는 데이터의 산포현상이 심하므로 다항식으로 맞춤 처리하여 곡선으로 나타내었다. 비교결과를 살펴보면, IPSAP/Explicit과 NET3D가 EPIC 보다는 전반적으로 시험치에 더 근접한 결과를 보이는데, 이는 사용된 물성모델의 차이도 하나의 원인으로 볼 수 있다.

IPSAP/Explicit과 NET3D은 전체적으로 서로 비슷한 결과를 보이나, -9.3도 일 때 잔류용력과 10.3도 일 때의 각속도는, IPSAP/Explicit이 시험에 더 근접한 결과를 보이고 있다.

#### 4. 결론

고속충돌에 의한 관통해석을 수치 모사할 수 있는 3차원 외연 유한요소 해석기법을 사용한 코드 IPSAP/Explicit을 개발하였고, 코드의 신뢰성 및 활용 가능성을 평가하기 위해, 기존의 시험결과 및 다른 고속 충돌해석 용 코드들과 해석 결과와 비교하였다. 비교 결과, 개발된 코드는 시험에서 관찰되는 주요한 변형 및 관통 특성이 해석상에서 재현 가능한 것으로 나타났고, 해석 결과도 다른 코드들에 비해 시험결과에 더 근접하는 것으로 나타나, 고속충돌에 의한 관통현상 해석에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.



후 기

이 연구는 ADD 장기 기초 과제(UD040012AD)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Z. H. Zhong, "Finite element procedures for contact-impact problems", Oxford University Press, 1993.
- [2] Belytschko T, Liu WK, Moran B, "Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures", Wiley, 2001.
- [3] Flanagan DP, Belytschko T. (1981), "A uniform starin hexahedron and quadrilateral with orthogonal hourglass control", Int. J. Numer. Mech. Engng. 17, pp.679~706, 1981.
- [4] Trusdell C, Noll W (1965), The non-linear field theories of mechanics, Handbuch Der Physik, Volume III/3, Springer, Berlin.
- [5] G. R. Johnson and W. H. Cook, "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.
- [6] Benson BJ, Hallquist JO (1990), A single surface contact algorithm for the post-buckling analysis of structures. Comput. Meth. Appl. Mech. Eng. 78:141-163.
- [7] Heinstein, MW, Attaway SW, Swegle JW, Mello FJ. (1993), "A general purpose contact detection algorithm for nonlinear structural Analysis codes", Sandia report, SAND92-2141.
- [8] D. A. Sewell, A. C. J. Ong and J. O. Hallquist, "Penetration calculation using an erosion algorithm in DYNA", The 12th International Symposium on Ballistics, 1990.
- [9] L. Holmberg, P. Lundberg and L. Westerling, "An experimental investigation of WHA long rods penetrating oblique steel plates", Proc. 14th Int. Symp. on Ballistics, Canada, pp.515~524, 1993.
- [10] Liden E, Ottosson J, Holmberg L. WHA long rods penetrating stationary and moving oblique steel plates. Proc. 16th Int. Symp. on Ballistics, San Francisco, USA, 1996, pp.711~719.
- [11] Lee M, YooYH (2003), "Assessment of a New Dynamic FE-Code: Application to the impact of a yawed rod onto non-stationary oblique plate", International Journal of Impact Engineering, Vol 29. pp.425~436.
- [12] E. Fugelso and J. W. Taylor, "Evaluation of combined obliquity and yaw for U 0.75 wt% Ti penetrators", Los Alamos Scientific Laboratory, LA-7402-MS, 1978.
- [13] D. J. Cagliostro, D. A. Mandell, L. A. Schwalbe, T. F. Adams and E. J. Chapyak, "MESA 3-D calculations of armor penetration by projectiles with combined obliquity and yaw", Int. J. Impact Engng., 10, pp.81~92, 1990.
- [14] G. R. Johnson and W. H. Cook, "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, 1993.