

# NET3D를 이용한 긴 관통자와 금속 판재의 경사충돌 해석

## Oblique Impact Analysis of Long Rod Penetrator against Metallic Plate using NET3D

유 요 한\*  
Yoo, Yo-Han

### ABSTRACT

Using the dynamic explicit program NET3D, oblique impact between long rod penetrator and metallic plate was analyzed. Compared with an experiment and AUTODYN-3D analysis result, the accuracy of NET3D program was examined. It was proved that NET3D program could analyze comparatively exactly oblique impact phenomenon between long rod penetrator and metallic plate. The final deformed configuration of penetrator predicted by NET3D program was more close to experimental result than commercial program AUTODYN-3D. But, in order to increase the reliability of NET3D program in the simulation of tensile fracture phenomenon, the additional research is required.

주요기술용어 : Oblique Impact(경사충돌), Long Rod Penetrator(긴 관통자), Numerical Simulation(수치해석)

### 1. 머리말

장갑에 대한 긴 관통자의 관통 능력을 저하시키기 위하여 관통자의 운동에너지를 분산시키는 방법이 많이 사용된다. 대표적인 예가 경사 판재나 반응장갑(reactive armor)을 사용하여 관통자에 비대칭 하중(asymmetrical loading)에 의한 부러짐이나 요(yaw)를 발생시키는 방법이다. 반응장갑의 경우 반응물질의 기폭과 폭발에 의한 판재의 가속 과정을 제외하면 관

통자와 운동 판재 사이의 충돌문제로 단순화된다. 결국 긴 관통자의 운동에너지를 효과적으로 분산시키기 위해서는 정지 및 운동 판재와 긴 관통자 사이의 충돌 현상에 대한 충분한 관찰 및 이해가 필요하다. 정지 및 운동 판재와 긴 관통자 사이의 충돌 현상을 지배하는 주요 변수는 관통자와 운동 판재의 속도, 관통자와 판재의 재료물성, 관통자와 판재의 기하학적 크기 등으로 알려져 있다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 3차원 고속충돌 및 파괴 해석이 가능한 라그랑지안(Lagrangian) 기반의 유한요소 프로그램 NET3D<sup>[2]</sup>를 사용하여 긴 관통자와 운동 및 정

\* 국방과학연구소 선임연구원

지 금속 판재 표적 사이의 경사 충돌 문제를 해석 한 후 관통 후 얻어진 관통자의 변형 형상을 기존의 실험 결과<sup>[3]</sup> 및 기존 충돌해석 전용코드 해석 결과<sup>[4]</sup>와 비교하여 고속 충돌 문제에 대한 NET3D의 정확성과 적용성을 평가해 보고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 수치해석에 사용된 NET3D 프로그램의 수식화 및 구성요소기술의 개요를 설명하고 3장에서 유한요소 모델링과 재료물성의 모델링 과정을 다룬다. 긴 관통자와 운동 및 정지 금속 판재 표적 사이의 경사 충돌 수치해석 결과 및 분석은 4장에 위치하고 마지막으로 5장에 결론이 위치한다.

## 2. NET3D의 개요

### 가. 유한요소 수식화

대부분의 구조해석 프로그램은 8절점 6면체 요소를 사용한다. 그러나 3차원 동적 해석을 위하여 8절점 6면체 요소를 사용하는 경우 4절점 4면체 요소에 비하여 몇 가지 단점이 있는 것으로 알려져 있다. 첫째, 비압축 상태에서 재료의 대변형시 체적잠김(volumetric locking)을 피하기 위해 1점 적분 방법을 사용하게 되는데 이 때 동반되는 모래시계 모드를 제어하여 요소의 거동을 안정화 시켜야 한다. 둘째, 하나의 면을 이루는 4개의 절점이 한 평면 위에 있지 못하기 때문에 접촉력 처리에 어려움이 발생된다. 셋째, 6면체 요소는 요소망 자동 생성이 곤란하여 복잡한 3차원 형상의 모델링이 어렵다. 4절점 4면체 요소를 사용하면 이상의 문제점을 해소될 수 있으며 NET3D도 4절점 4면체 요소를 사용한다.

NET3D는 4면체 요소의 표준 수식화 과정에 따른

체적잠김현상을 회피하기 위하여 압력을 독립 변수로 처리한 Zienkiewicz의 속도-압력 혼합정식(velocity-pressure mixed formulation) 방법<sup>[5]</sup>을 사용하였다. Zienkiewicz의 속도-압력 혼합정식 방법은 operator splitting method를 사용하여 수식을 나누어 계산하는 방법이다. operator splitting method를 도입하여 계산할 때 먼저 압력 항이 빠진 운동량 방정식을 이용하여 임시 중간 속도를 계산한 후 이를 사용하여 연속 방정식에서 압력을 계산한다. 그리고 마지막으로 임시 중간 속도와 계산된 압력을 이용하여 최종 속도를 계산할 수 있다. 4절점 4면체 요소에 Zienkiewicz가 제안한 혼합 정식을 적용하면 압력과 속도에 같은 내삽 함수를 사용한다. 이 때 사용되는 내삽 함수는 1차 함수이기 때문에 적분점이 하나이더라도 의사 모드(spurious mode)가 발생되지 않는다.

### 나. 시간 적분 알고리즘

시간 적분 알고리즘으로는 수정 중앙 차분 방법(modified central difference scheme)을 사용하였다. 이 방법에서 속도는 전방 차분 방법(forward difference scheme)으로 적분하고 변위는 후방 차분 방법(backward difference scheme)으로 적분한다. 시간증분(time step) 크기는 모든 요소들의 최소 시간증분 크기를 계산하여 그 중 가장 작은 값을 사용하였다.

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. NET3D에서는 객관적인 응력 속도로 Green-Naghdi 응력 속도를 사용하였다. 극분해(polar

decomposition)와 Green-Naghdi 응력 속도를 이용한 응력 갱신 알고리즘(stress update algorithm)은 Taylor와 Flannagan<sup>[6]</sup>의 방법을 적용하였다.

다. 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>[7]</sup>과 bucket sorting 알고리즘<sup>[8]</sup>을 적용하였고 접촉력 계산은 방어 절점 알고리즘(defense node algorithm)<sup>[8]</sup>을 적용하였다. 방어 절점 알고리즘은 penalty 방법 등 다른 접촉력 계산 알고리즘과 달리 사용자가 정해주어야 하는 인자가 필요 없는 접촉력 계산 알고리즘이다.

요소 소진 알고리즘(element eroding algorithm)은 해석 도중 주어진 파괴 조건을 만족하거나 변형이 심하게 발생한 요소를 제거하는 해석 기법<sup>[9]</sup>이다. 관통 해석 등에서 심하게 변형된 요소는 시간 증분의 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 요소가 소진된 후 격자재구성(remeshing)을 수행할 필요가 없다.

라. 전처리 및 후처리

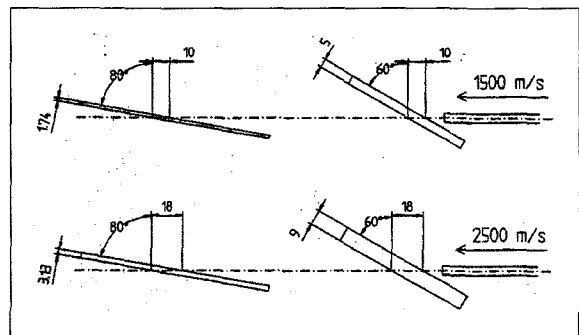
NET3D의 수치해석을 수행하기 위하여 주어진 해석 영역을 유한요소로 분할하기 위한 전처리와 해석 결과의 분석을 위한 후처리 과정이 필요하다. 본 논문

에서는 전처리와 후처리를 위하여 3차원 모델러인 SDRC사의 I-DEAS를 사용하였다.

3. 수치해석 모델링

가. 유한요소 모델링

해석에 사용된 텅스텐 탄자는 지름 5 mm, 길이 75 mm이고 강판의 폭은 50mm, 강판의 길이는 경사각 60°의 경우 76 mm, 경사각 80°의 경우 106 mm를 사용하였다. 강판의 두께는 경사각 60°의 경우 9 mm(충돌 속도 2.5 km/s)와 5 mm(충돌 속도 1.5 km/s)를 사용하였고 경사각 80°의 경우 3.13 mm(충돌 속도 2.5 km/s)와 1.74 mm(충돌 속도 1.5 km/s)를 사용하였다. 강판의 두께는 같은 충돌 속도의 경우 탄자가 통과하는 표적 강판의 두께가 같아지도록 모델링되었다. 그림 1에 긴 관통자의 정지 경사판재 충돌 해석에 사용된 탄자와 표적의 형상과 속도를 나타내었다. 해석에 사용된 모델은 대칭성을 고려하여 전체 모델의 절반만을 계산에 사용하였고 과도한 요소의 생성을 방지하기 위하여 충돌에 의한 변형이 미치는 범위를 고려하여 심한 변형이 발생될 것이 예상되



[그림 1] 긴 관통자와 정지 경사판재의 충돌해석에 사용된 형상 및 속도

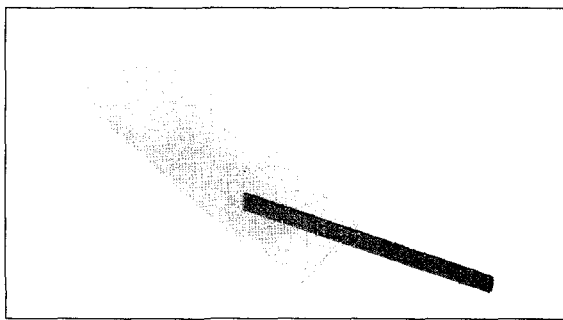
는 탄자 전체와 표적의 관통 경로 부근에 조밀한 요소를 사용하였다.

그림 2는 60° 경사 표적, 2.5 km/s 충돌 해석과 80° 경사 표적, 2.5 km/s 충돌 해석에 사용된 초기 유한 요소 격자망의 형상을 나타내고 있다. 탄자와 60° 경사 표적의 경우 사면체 한 변의 길이가 0.8 mm가 되도록 요소를 생성하였고 80° 경사 표적의 경우 표적의 두께가 얇은 점을 고려하여 한 변의 길이가 0.7 mm가 되도록 요소를 생성하였다. 60° 경사 표적, 1.5 km/s 충돌의 경우 27611개의 4절점 사면체 요소와 6613개의 절점으로 구성되어 있으며, 60° 경사 표적, 2.5 km/s 충돌의 경우 47238개의 4절점 사면체 요소와 10210개의 절점, 80° 경사 표적, 1.5

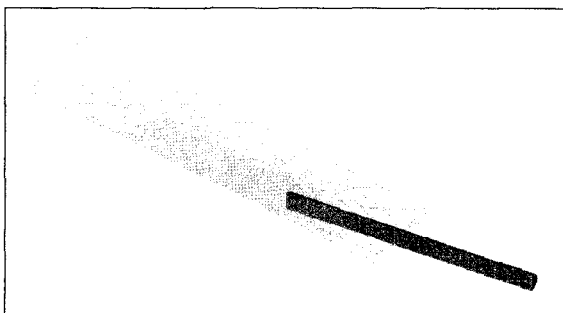
km/s 충돌의 경우 24167개의 4절점 사면체 요소와 6476개의 절점, 80° 경사 표적, 2.5 km/s 충돌의 경우 36325개의 4절점 사면체 요소와 8731개의 절점으로 해석 모델을 구성하였다. 운동 표적 해석에서는 60° 경사 표적, 1.5 km/s 충돌 해석에 사용된 요소망을 그대로 사용하였다.

#### 나. 재료 모델링

금속재료의 고속 충돌시 정적변형에서 고려되는 변형을 경화 이외에 변형률 속도 경화 현상과 단열변형에 따른 열적 연화 현상이 동반되므로 이러한 현상들을 동시에 고려하기 위하여 JC 모델(Johnson-Cook model)<sup>[10]</sup>을 사용하였다. 금속재료의 인장파괴 조건은 설정하지 않고 등가 소성 변형률을 이용한 요소 소진만을 계산에 고려하였다. 요소 소진 조건에 사용된 등가 소성 변형률 값은 2.0으로 설정하였으며 유 등<sup>[2]</sup>의 해석 결과를 토대로 다른 값의 선정에 따른 영향은 분석하지 않았다. 해석에 사용된 텅스텐 중합금과 강판의 물성은 비교를 쉽게 하기 위하여 Liden의 논문<sup>[4]</sup>에 제시된 값을 그대로 사용하였다. 시험에 사용된 관통자 재료(텅스텐 중합금)은 Pechiney에서 제조된 DX2HCMF이고 판재 재료는 장갑 판재의 일종인 SIS 2541-03이다. 고속 변형중 발생된 소성변형 에너지가 열에너지로 바뀌는 비율을 나타내는 Taylor-Quinney 상수값은 0.85로 설정하였다. AUTODYN-3D의 경우 요소 소진 조건에 사용되는 등가 소성 변형률을 2.5로 선정하였고 표적의 파괴 조건으로 12%의 체적 변형률(bulk strain)을 사용하였으나 탄자의 파괴 조건은 설정하지 않았다. 그러나 NET3D 해석에서는 어떠한 파괴 조건도 설정하지 않았다. 표 1은 해석에 사용된 텅스텐과 강의 재료 상수를 나타낸다. JC 모델의 재료 상수에 대한 설명은 참고문헌[2]를



두께 9 mm



두께 3.13 mm

[그림 2] 긴 관통자의 정지 경사판재 충돌해석에 사용된 요소 격자망

[표 1] 계산에 사용된 재료 상수

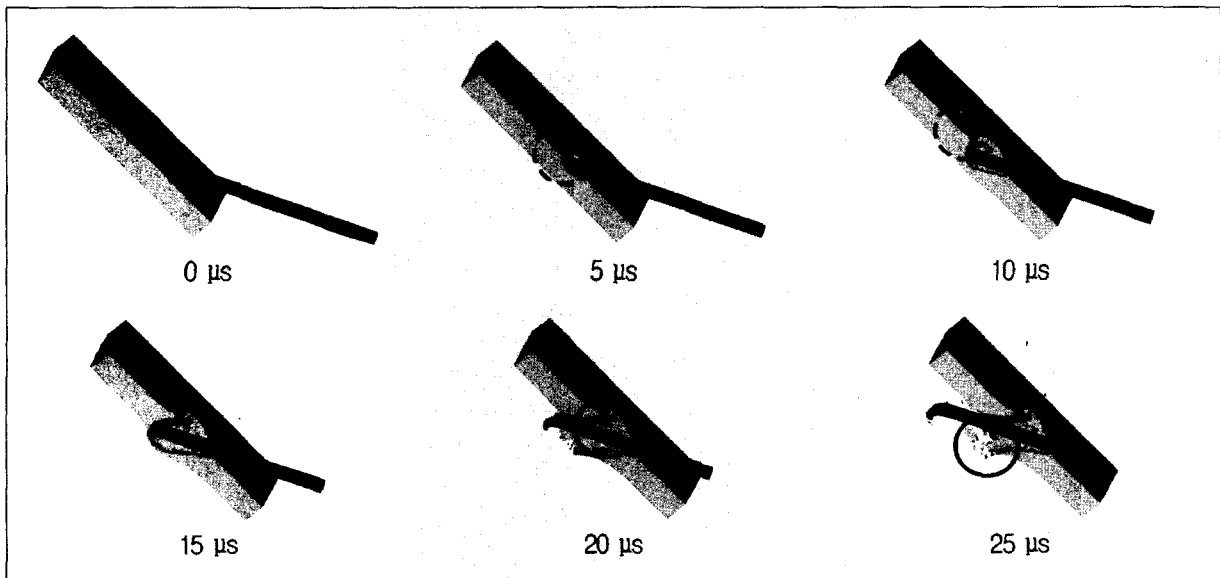
재료 상수	재료 상수 값	
	텅스텐 (DX2HCMF)	강(SIS 2541-03)
Young's Modulus(GPa)	389.16	200.10
Poisson's ratio	0.28	0.30
Density (g/cm <sup>3</sup> )	17.60	7.87
A (GPa)	1.05	0.75
B (GPa)	0.177	1.15
C	0.0275	0.014
n	0.12	0.49
m	1.0	1.0
Tref (°C)	20	20
Tmelt (°C)	1450	1427

참조하기 바란다.

#### 4. 수치해석 결과

##### 가. 긴 관통자와 정지 경사판재의 충돌해석

NET3D를 이용하여 충돌 경사각 60°와 충돌 경사각 80°에 대하여 1.5 km/s와 2.5 km/s의 충돌속도에 대한 해석을 수행하였다. 그림 3은 충돌 경사각 60°, 충돌 속도 2.5 km/s로 충돌 시 탄자의 관통 거동을 도시한 것이다. 관통 초기에 탄자의 머리가 뭉툭하므로 머리의 일부가 판재와의 접촉에 의하여 전단 변형을 일으켜 떨어져 나가는 현상이 관찰(그림 3의 점선 부분)된다. 판재 관통 초기에는 상대적으로 변형 저항이 작은 윗 부분으로 변형이 집중되어 상부의 관통구가 커지고 판재 관통 후기에는 변형 저항이 큰 윗 부분 대신 저항이 작은 아래 부분으로 변형 흐름이 형성되어 하부의 관통구가 커지는 경향(그림 3의 실선



[그림 3] 긴 관통자의 정지 경사판재(탄속 2.5 km/s, 경사각 60°) 관통 거동

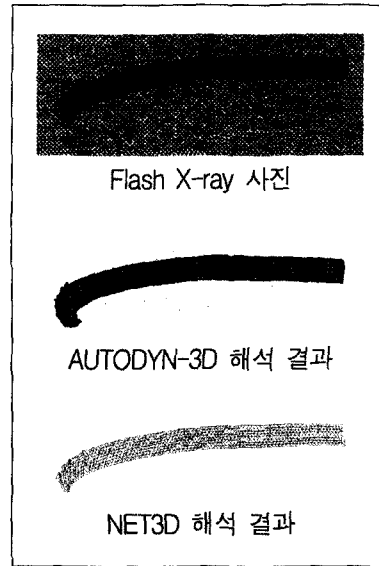


[그림 4] 긴 관통자의 정지 경사판재(탄속 2.5 km/s, 경사각 60°) 최종 관통 형상

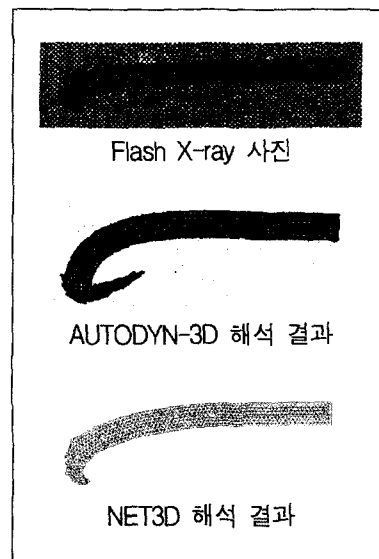
부분)을 보인다. 판재를 관통한 관통자는 아래쪽으로 변형 모드가 형성되어 앞쪽이 휘어진 형상을 가지게 된다.

그림 4는 판재와 충돌 후 150  $\mu$ s가 경과된 후의 관통자의 형상을 나타낸 것이다. 탄자의 앞 부분이 많이 휘어 원래 탄도로부터 벗어나 있는 모양이 관찰된다.

해석 결과 얻어진 관통자의 최종 형상(충돌 후 150  $\mu$ s 경과한 형상)을 시험 결과 및 AUTODYN-3D 해석 결과와 비교하여 그림 5, 6, 7, 8에 나타냈다. 5 mm, 9 mm, 1.74 mm 두께의 정지 경사 판재와의 충돌 결과를 나타낸 그림 5, 6, 7에서 Flash X-ray 사진과 NET3D의 해석 결과는 거의 정확하게 일치하고 있다. 그러나 3.13 mm 두께의 정지 경사 판재와의 충돌 사진에는 탄두부의 굽힘에 의한 인장 파괴로 추정되는 파편이 관찰되지만 NET3D와 AUTODYN-3D의 해석 결과에는 유사한 크기의 파단되지 않은 탄두부가 관찰된다(그림 8의 점선 부분). 정지 판재와 긴 관통자의 충돌 문제 해석 결과를 분석하면 NET3D를 이용할 때 파단 현상이 현저하지 않은 문제의 경우 매우 정확한 변형 형상의 예측이 가능하며 파단 조건을 설정하는 기능을 추가 할 경우 금속 재료 사이의 충돌 문제를 신뢰성있게 예측할 것으로



[그림 5] 긴 관통자의 정지 경사판재(두께 5 mm) 충돌해석 결과 비교



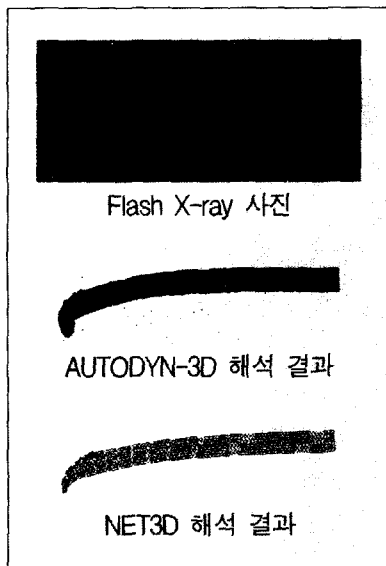
[그림 6] 긴 관통자의 정지 경사판재(두께 9 mm) 충돌해석 결과 비교

예상된다.

정지 경사 판재와 긴 관통자의 충돌 후 얻어진 잔류 길이, 잔류 속도, 각속도의 크기를 계측하여 시험

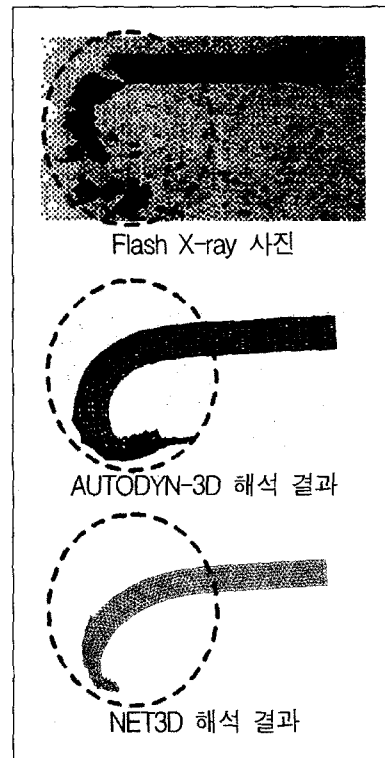
[표 2] 긴관통자의 정지 경사판재 충돌해석 결과 비교

충돌 경사각 (°)	충돌 속도 (km/s)	잔류 길이(L/Lo)			잔류 속도(V/Vo)			각속도( $10^3$ °/s)		
		시험	AUTODYN -3D	NET3D	시험	AUTODYN -3D	NET3D	시험	AUTODYN -3D	NET3D
60	1.5	0.85	0.87	0.85	0.97	0.98	0.98	80	48	68
	2.5	0.76	0.75	0.77	0.99	0.99	0.99	70	96	76
80	1.5	0.84	0.85	0.85	0.97	0.97	0.98	93	54	77
	2.5	0.62	0.68	0.67	0.98	0.98	0.99	165	254	145



[그림 7] 긴 관통자의 정지 경사판재(두께 1.74 mm) 충돌해석 결과 비교

및 AUTODYN-3D의 해석결과와 비교하여 표 2에 정리하였다. NET3D의 해석 결과는 충돌 150  $\mu$ s 후 계측된 값을 사용하였다. 잔류 길이와 잔류 속도의 경우 NET3D, AUTODYN-3D 모두 시험 결과와 일치하는 결과를 얻었으나 각속도의 경우 시험 결과와 다소 차이를 보였다. 그러나 NET3D의 해석 결과가 AUTODYN-3D의 해석 결과보다 시험 결과에 좀 더



[그림 8] 긴 관통자의 정지 경사판재(두께 3.13 mm) 충돌해석 결과 비교

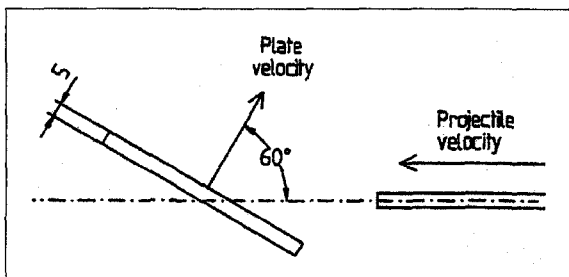
근접한 것으로 나타났다. 그림 5, 6, 7, 8과 표 2의 결과를 토대로 볼 때 NET3D의 해석 결과는 전반적으로 AUTODYN-3D의 해석 결과보다 우수한 것으로

평가된다.

나. 긴 관통자와 운동 경사판재의 충돌해석

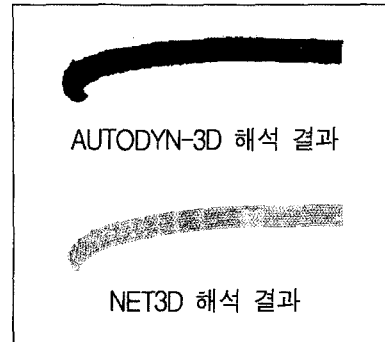
앞에서 긴 관통자와 정지 경사 판재 사이의 충돌에 대하여 살펴보았다. 긴 관통자와 운동 경사 판재의 충돌 현상에 대한 고찰을 위하여 판재의 수직 방향으로 운동하는 5 mm 수직 두께를 가진 60° 경사 표적과 긴 관통자의 충돌 현상을 해석하였다. 관통자의 충돌 속도는 1.5 km/s와 2.5 km/s이고 판재의 수직 방향 속도는 0 km/s, 0.2 km/s 그리고 0.5 km/s를 고려하였다. 관통자 및 판재의 유한 요소 모델은 정지 판재 계산에 사용된 5 mm 판재 모델을 그대로 사용하였다. 그림 9는 계산 조건 및 형상을 나타낸 모식도이다.

해석 결과 얻어진 관통자의 최종 단면 형상(충돌 후 150 μs 경과한 형상)을 AUTODYN-3D 해석 결과와 비교하여 그림 10, 11, 12, 13에 나타냈다. 해석 결과는 충돌 후 150 μs 경과된 탄자의 형상을 도시한 것이다. AUTODYN-3D의 해석 결과에서 탄자의 충돌 속도 및 판재의 이동 속도에 따른 영향은 크게 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으나 NET3D의 해석에서는 판재의 이동 속도가 커질수록 관통자와 판재 사이의 상호 간섭이 많아져 관통자의 하부가 심한 변형을 받는 것으로 나타났다. 그러나 관통자의 탄속이

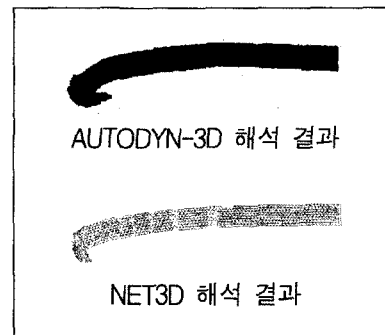


[그림 9] 긴 관통자의 운동 경사판재 충돌해석 모식도

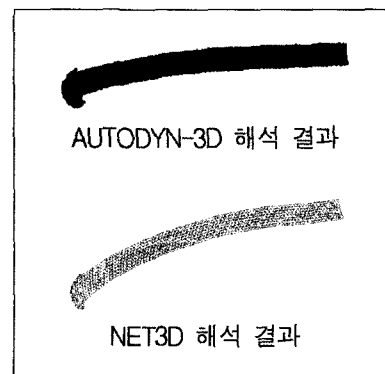
빨라지면 관통자와 판재 사이의 상호 간섭이 발생하는 시간이 줄어들어 이런 경향이 줄어든다. 판재의 운



[그림 10] 긴 관통자의 운동 경사판재(탄자 1.5 km/s, 판재 0 km/s, 60°) 충돌해석 결과 비교

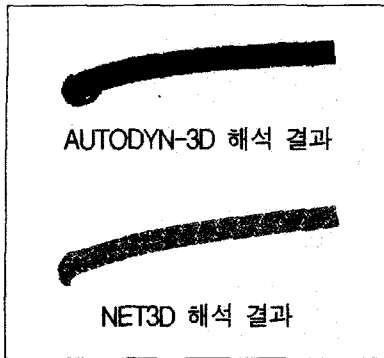


[그림 11] 긴 관통자의 운동 경사판재(탄자 2.5 km/s, 판재 0 km/s, 60°) 충돌해석 결과 비교



[그림 12] 긴 관통자의 운동 경사판재(탄자 1.5 km/s, 판재 0.2 km/s, 60°) 충돌해석 결과 비교





[그림 13] 긴 관통자의 운동 경사판재(탄자 2.5 km/s, 판재 0.2 km/s, 60°) 충돌해석 결과 비교

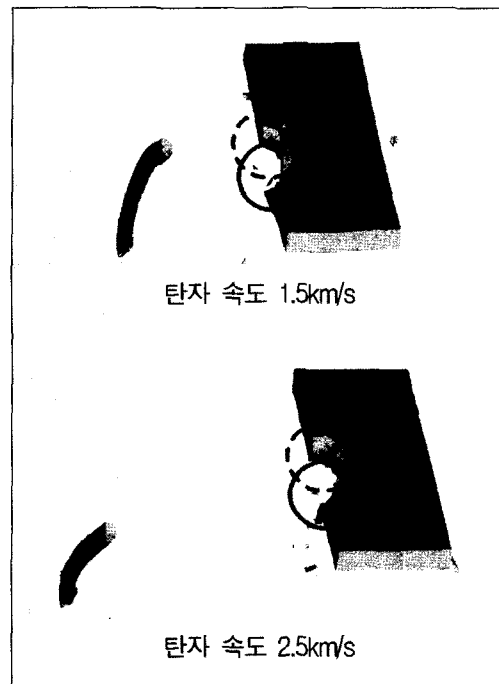
동 속도가 증가할수록 상호간섭에 의한 관통자 손상이 심해지고 관통자의 회전이 커져 충돌 자세가 나빠지므로 관통자의 위력은 감소될 것으로 예상된다.

이러한 경향은 관통 후 판재의 형상을 나타낸 그림 14, 15, 16에서도 확인할 수 있다. 관통자의 속도가 커지면 판재의 관통 구멍의 지름이 증가한다(그림 15의 점선 부분). 한편, 판재의 운동 속도가 증가함에 따라 관통자와 판재의 상호 간섭에 의한 영향이 커져 관통자 하부의 손상과 판재 상의 열쇄 구멍(key hole) 형상이 더욱 뚜렷해진다(그림 15의 실선 부분). 그림 16에서 뚜렷한 열쇄 구멍 형상을 확인할 수 있다. 그러나 관통자의 속도가 증가하면 열쇄 구멍의 길이가 감소한다. 이것은 앞에서 설명한바와 같이 관통자와 판재 사이의 상호 간섭이 발생하는 시간이 줄어들었기 때문이다. 그림 16 (a)와 같이 열쇄 구멍의 길이가 증가할수록 판재에 의하여 관통자의 측면에 가해지는 충격량이 증대되므로 관통자가 비대칭력에 의하여 부러질 가능성이 높아진다. 만약 관통자가 부러진다면 잔류 관통자가 몇 개로 나뉘어진 채 넓은 범위에 걸쳐 충돌하게 되므로 관통 능력이 현저히 약화된다.

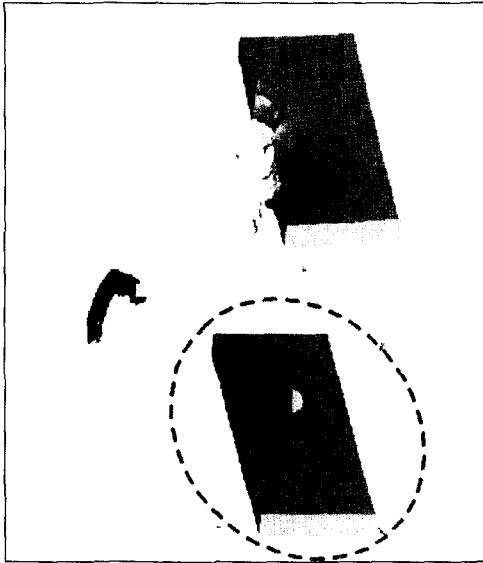
그림 14, 15에 비해 그림 16의 관통자와 판재 사이의 거리가 먼 것은 판재의 초기 운동 속도가 커서 같



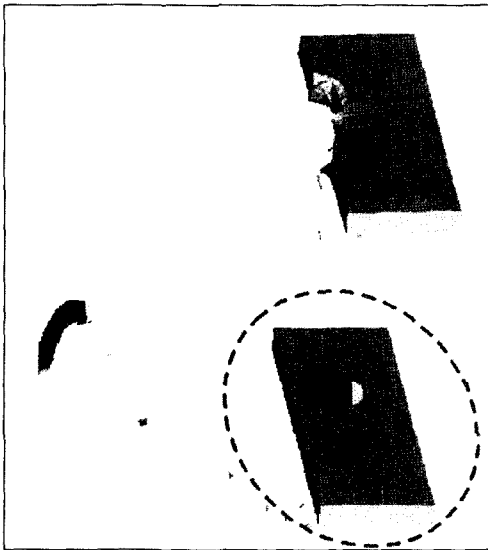
[그림 14] 긴 관통자의 정지 경사판재(경사각 60°) 최종 관통 형상



[그림 15] 긴 관통자의 운동 경사판재(판재 속도 0.2 km/s, 60°) 최종 관통 형상



(a) 탄자 속도 1.5 km/s



(b) 탄자 속도 2.5 km/s

[그림 16] 긴 관통자의 운동 경사판재(판재 속도 0.5 km/s, 60°) 최종 관통 형상

은 시간 동안에 판재가 많이 이동하기 때문이다. 그림 16 (a)와 그림 16 (b)의 점선 부분은 판재와 탄자가 충돌하기 직전의 형상과 위치를 나타낸다.

### 5. 맺음말

동적 충격해석 프로그램 NET3D를 이용하여 긴 관통자와 운동 및 정지 금속 판재 표적 사이의 경사 충돌 현상을 해석한 후 해석결과를 기존의 실험 및 AUTODYN-3D 해석결과와 비교하여 NET3D 프로그램의 정확성과 적용성을 살펴보았다.

분석 결과 NET3D 프로그램은 긴 관통자와 운동 및 정지 금속 판재 표적 사이의 경사 충돌 현상을 비교적 정확하게 분석할 수 있는 것으로 판명되었으며 상용 프로그램인 AUTODYN-3D보다 실험 결과에 가까운 해석결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 인장 응력에 의한 파괴 현상이 현저한 경우의 해석 신뢰성을 제고시키기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

앞으로 NET3D 프로그램은 고속 충돌 및 충격 분야의 M&S(Modelling and Simulation)를 위한 기본 도구로 활용되어 무기체계의 적기 개발 및 비용 단축에 크게 기여할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- [1] W. Goldsmith, "Non-ideal projectile impact on targets", Int. J. Impact Engng., 22, pp.95 ~395, 1999.
- [2] 유요한, 장순남, 정동택, "연강 판재에 대한 연강 구의 고속 경사 충돌 수치해석", 대한기계학회논문집 A권, 제26권, 제3호, pp.576~585, 2002.
- [3] 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.
- [4] E. Liden, J. Ottosson and L. Holmberg, "WHA long rods penetrating stationary and moving oblique steel plates", Proc. 16th Int. Symp. on Ballistics, USA, pp.711~719, 1996.
- [5] O. C. Zienkiewicz, J. Rojek, R. L. Taylor and M. Pastor, "Triangles and tetrahedral in explicit dynamic codes for solids", Int. J. Numer. Engng. 43, pp.565~583, 1998.
- [6] L. M. Taylor and D. P. Flanagan, "PRONTO2D, a two-dimensional transient solid dynamic problems", Sandia National Laboratories, 1987.
- [7] M. Oldenburg and L. Nilsson, "The position code algorithm for contact searching", Int. J. Numer. Mech. Engng. 37, pp.359~386, 1994.
- [8] Z. H. Zhong, "Finite element procedures for contact-impact problems", Oxford University Press, 1993.
- [9] 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.
- [10] 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, 1983.