

## 실험식을 통한 고속 관통자의 지반 관통 깊이 예측에 대한 연구

장택진\* · 김종봉\*\* · 김석봉\*\*\* · 이창환\*\*\*\*

\* 서울과학기술대학교 자동차공학과, \*\* 서울과학기술대학교 기계자동차공학과,  
\*\*\* 국방과학기술연구소 제4기술연구본부, \*\*\*\* 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

### Penetration Depth of High-velocity Projectiles for Geomaterials through an Empirical Equation

Taek Jin Jang\*, Jong-Bong Kim\*\*, Seok Bong Kim\*\*\* and Chang-Whan Lee\*\*\*\*

\* Dept. of Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech.,  
\*\* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech.,  
\*\*\* The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development,  
\*\*\*\* Dept of Mechanical System Design Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech.

(Received January 22, 2020 ; Revised March 11, 2020 ; Accepted March 17, 2020)

**Key Words:** Penetration(침투), Perforation(관통), Projectile(관통자), Penetration Depth(침투 깊이), Residual Velocity(잔류 속도)

**초록:** 관통자의 형상 설계에서는 관통자의 형상, 지질 특징에 따른 관통자의 투과 특성을 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 관통자의 투과 특성을 빠르고 정확하게 예측하고자 Young에 의해 제안된 실험식을 사용하였다. 이를 검증하기 위해 본 연구에 따른 해석 결과를 기존의 연구 결과와 비교하였다. 흙, 암석, 콘크리트 재료에 대해 속도, 침투 각도에 대한 침투 깊이에 대해 실험 결과와 해석 결과를 비교하여, 해석 모델의 유효성을 검증하였다. 그리고 관통자의 흙 지반 재료에 대해 관통 실험을 하였다. 실험 결과와 해석 결과에서 관통자의 침투 깊이와 잔류 속도를 비교하였다. 관통 실험에서, 투과 후 속도 오차는 0.92%, 1.91%였고, 단층 침투 깊이 실험에서 오차는 9.31%와 4.62%였다. 이를 통해 실험실을 사용한 관통자의 투과 특성 분석 방법이 관통자의 거동을 정확하고, 효율적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

**Abstract:** When designing projectiles, the prediction of the penetration depth is an important problem. In this paper, a fast penetration analysis method using an empirical equation suggested by Young is presented. The proposed method was validated by predicting the penetration depth for soil, rock, and concrete targets and comparing the results with the experimental data of previous works. The proposed method was verified by the comparison of the penetration depth and residual velocity values obtained in the experiment and the results of the empirical equation. The errors of the residual velocity were 0.92 % and 1.91 %, and for the penetration depth, they were 9.31 % and 4.62 %. The proposed method predicts the penetration behavior of the projectile accurately and efficiently.

#### 1. 서론

관통자의 지중 침투 성능을 예측하여 뛰어난 침투 성능을 갖는 관통자 형상을 설계하는 것은 관통자 설계에 중요한 부분을 차지하며, 관통자

의 지중 침투에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Ju 등<sup>(1)</sup>은 콘크리트 표적을 침투하는 관통자의 세장비와 화약량에 따른 탄체 생존성을 분석하였고 Kim 등<sup>(2)</sup>은 콘크리트 표적 크기에 따른 침투 깊이 및 잔류 속도를 분석하였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 공동 확장 이론을 이용해서 관통자가 받는 저항력을 모델링하여 관통자의 거동을 예측하였고

† Corresponding Author, [cwlee@seoultech.ac.kr](mailto:cwlee@seoultech.ac.kr)

Yang 등<sup>(4)</sup>은 복합 침투 관통자의 침투 성능을 예측하였다.

그러나 지중 침투 실험으로 뛰어난 침투 성능을 갖는 관통자 형상을 설계하는 것에는 한계가 있다. 특히 관통자는 제작비가 비싸고, 실험을 진행하는데 준비 시간과 진행 시간이 오래 소요될 뿐만 아니라 필요 금액 역시 높아 실험의 진행이 어려운 실정이다. 또한 실험으로 얻을 수 있는 정보가 많지 않고, 오차를 포함하고 있어 설계 변수의 영향을 정확하게 파악하기 어렵다. 특히 관통자의 최적 침투 성능을 위한 형상 설계에 있어서는 다수의 실험 결과가 필요하다.

이와 같은 단점으로 인해 실험만을 통해서 설계를 진행하는 것은 한계가 있다. 이에 따라 지중 침투를 모사하여 해석과 실험 결과를 비교하는 연구가 진행되어 왔다. Huang 등<sup>(5)</sup>은 비점성 토에 대해 지중 침투 실험과 유한요소 해석을 비교하여 관통자의 저항에 영향을 끼치는 인자를 분석하였고, Tolooiyani 등<sup>(6)</sup>은 압축 토양에 대해 공동 확장 이론과 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) 기법을 사용하여 관통자 팁 부분의 응력을 분석하였다. Gama 등<sup>(7)</sup>은 복합 재료에 대한 침투 실험과 유한요소 해석을 비교하였고 이에 대한 오차를 손상 진화 이론을 통해 보정하였다. Talebi 등<sup>(8)</sup>은 고강도 섬유 소재에 대해서 침투 실험과 유한요소 해석을 비교하였고 소재의 변형에 대해 관통자 노즈 각도의 영향을 분석하였다. 그리고 He 등<sup>(9)</sup>은 섬유 강화 플라스틱에 대해 침투 실험과 유한요소 해석을 비교하였고 관통자 노즈 형상에 따른 침투 깊이, 잔류 속도에 대해 분석하였다.

전산 모사를 통한 해석에서는 침투 성능을 예측해야 하기 때문에, 지중 침투 모델에 대한 해석이 필요하다. 특히 지질의 경우에는 지질 밀도, 구성 성분 등과 같은 지질 특성을 고려한 유한요소 해석이 필요하다. 그러나 관통자의 탄소성 변형 및 이동 경로를 고려하면서 지질 모델과 관통자를 동시에 유한요소 해석을 진행하는 것은 매우 어려운 문제이다. 따라서 빠른 분석이 가능한 실험식 기반 지중 침투 거동 모사 모델의 개발이 필요하다.

이에 대한 효율적인 해석 방법으로 Young<sup>(10)</sup>은 실험식을 기반으로 한 식을 제안하였다. 본 연구에서는 Young<sup>(10)</sup>에 의해 제안된 침투 방정식

을 이용하여 실험식 기반의 지중 침투 거동 모사 프로그램을 개발하였다. 먼저, 기존의 연구 사례<sup>(11~14)</sup>를 통해 흙, 암석, 콘크리트에 대해서 개발된 프로그램을 검증하였다. 흙 단층 관통 실험과 침투 실험을 진행하여 프로그램 결과와 비교함으로써, 해석 모델이 탄두의 거동을 정확하고 효율적으로 예측할 수 있음을 확인하고자 하였다.

## 2. 실험식을 통한 투과 깊이 예측

### 2.1 실험식 기반 관통자 거동 예측 방법

Young<sup>(10)</sup>은 실험식을 기반으로 경사 침투 조건에서 관통자의 침투 깊이, 관통 후 잔류 속도 등을 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. Fig. 1은 경사 침투(oblique penetration) 조건을 표현한 그림이다.

#### 2.1.1 침투 깊이 예측

경험식을 기반으로 한 침투 성능 모사 모델은 Young의 방정식을 통해 지질 물질에 대한 침투 거동을 분석할 수 있다. Young의 방정식을 간단히 요약하면 다음과 같다.

$$D = 0.0008SNK_s(m/A)^{0.7} \ln(1 + 2.15V^2 10^{-4}) \quad (1)$$

$$D = 0.000018SNK_s(m/A)^{0.7}(V - 30.5) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서  $D$ 는 예상되는 침투 깊이,  $S$ 는 지질의 S-number,  $N$ 은 관통자의 노즈 성능 계수,  $K_s$ 는 지질 무게 보정 계수,  $m$ 은 관통자의 무게,  $A$ 는 관통자의 단면적,  $V$ 는 관통자의 속도를 뜻한다. 식 (1)은 관통자의 속도  $V$ 가 61m/s 미만일 때 사용하며, 식 (2)는  $V$ 가 61m/s 이상일 때 사용한다.

관통자가 층을 관통한 경우, 다음 식을 통해

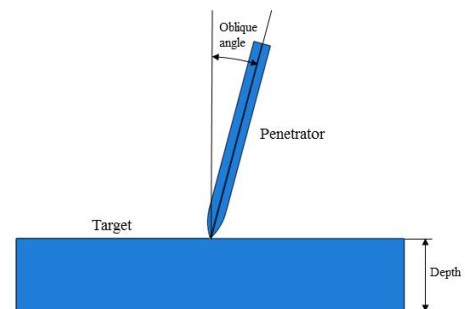


Fig. 1 Schematic figure of the oblique penetration

관통자의 잔류 속도를 예측할 수 있다.

$$V_{res} = V \sqrt{1 - \frac{T}{D \cos \theta}} \quad (3)$$

식 (3)에서  $V_{res}$ 는 관통 후 관통자의 잔류 속도,  $T$ 는 지질층의 두께이다. 식 (3)은 예측된 투과 깊이( $D$ )가 지질층의 두께( $T$ )보다 클 경우에만 적용될 수 있다.

실험식을 기반으로 하여 만들어진 식이기 때문에, 모든 조건에 적용하고, 일반적으로 사용하기에는 무리가 있다. 하지만 일반적인 조건에 있어서는 관통자의 침투 깊이를 예측할 수 있다. 또한 흙, 암석, 콘크리트 등과 같이 다양한 지질 조건을 식에 적용할 수 있고, 관통자의 형상 역시 식에 적용하여 투과 깊이를 예측할 수 있다. 그러나 지면에 대해 경사진 방향으로 침투하는 경우에는 관통자의 변형으로 인해 투과 깊이 예측이 부정확할 수 있고, 복잡한 관통자 형상이나, 지면 조건, 내충 조건 등에 대해서는 식의 적용이 어렵다.

### 2.1.2 지질강도계수(S-number)

지질의 구성 및 강도에 따라 S-number가 달라지고, 투과 깊이에 대해 S-number가 비례 관계에 있다. 따라서 정확한 투과 깊이를 예측하기 위해서는 S-number를 정확히 결정할 필요가 있다. Table 1은 흙의 S-number를 나타낸 표이다.

암석의 S-number를 구하는 식은 다음과 같다.

$$S = 2.7(f'_c Q)^{-0.3} \quad (4)$$

식 (4)에서  $f'_c$ 는 일축 압축 강도,  $Q$ 는 암석의 품질에 대한 상수이다.  $Q$ 는 0.1과 1 사이의 값으

로, 암석의 품질이 좋을수록 큰 값을 가진다. 기본 값은 0.5이다.

콘크리트의 S-number를 구하는 식은 다음과 같다.

$$S = 0.085 \left( \frac{F}{W_1} \right)^{0.3} (11 - P)(t_c T_c)^{-0.06} \left( \frac{35}{f'_c} \right)^{0.3} \quad (5)$$

식 (5)에서  $W_1$ 는 콘크리트 층의 너비,  $P$ 는 철근의 용적률,  $t_c$ 는 경화 시간,  $T_c$ 는 층의 두께,  $f'_c$ 는 일축 압축 강도이다.  $F$ 는 강화 콘크리트의 경우 20의 값을 가지고, 일반 콘크리트의 경우에는 30의 값을 가진다. 콘크리트의 기본 S-number는 0.9이다.

Table 1과 식을 통해 각 지질 물질의 S-number를 결정할 수 있다. 그러나 흙의 경우에는 S-number가 범위로 주어지기 때문에 실험 결과와의 보정을 통해서 정확한 투과 깊이를 예측할 수 있다.

### 2.1.3 지질 무게 보정 계수( $K_s$ )

Young의 방정식에서는 관통자의 무게가 매우 낮을 경우에 대해서 침투 깊이 오차를 보정하기 위해 지질 무게 보정 계수를 사용하며, 이는 다음과 같다.

$$K_s = 0.27m^{0.4} \quad (m < 27kg) \quad (6)$$

$$K_s = 0.46m^{0.15} \quad (m < 181kg) \quad (7)$$

식 (6)은 흙에 대한 무게 보정 계수이며 무게가 27kg보다 낮을 때 적용된다. 식 (7)은 암석, 콘크리트에 대한 무게 보정 계수이며 무게가 181kg보다 낮을 때 적용된다. 식 (6)과 (7) 모두 범위 밖의 무게인 경우,  $K_s$ 는 1이다.

Table 1 S-number of typical soils<sup>(10)</sup>

S-number	Target description
2 ~ 4	Dense, dry, cemented sand. Dry caliche. Massive gypsite and selenite deposits.
4 ~ 6	Gravel deposits. Sand, without cementation. Very stiff and dry clay.
6 ~ 9	Moderately dense to loose sand, no cementation, water content not important.
8 ~ 10	Soil fill material, with the S-number range depending on compaction.
5 ~ 10	Silt and clay, low to medium moisture content, stiff.
10 ~ 20	Silt and clay, moist to wet, topsoil, loose to very loose.
20 ~ 30	Very soft, saturated clay. Very low shear strength.
30 ~ 60	Clay marine sediments.
> 60	It is likely that the penetration equation do not apply.

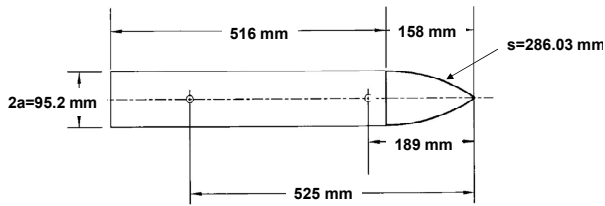


Fig. 2 Projectile shape of validation model about soil

2.1.4 노즈 성능 계수(N)

관통자 노즈는 지질과 직접적으로 접촉하는 부분으로써 침투 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서 정확한 예측을 위해서는 노즈 형상의 영향을 고려해주어야 하며, Young의 방정식에서는 ogive, conical 타입의 노즈를 사용할 수 있다. Ogive 노즈는 Fig. 2와 같은 형상의 노즈이고, conical 노즈는 일반적인 원뿔 형상의 노즈이다. 노즈에 대한 식은 다음과 같다.

$$N = 0.18(CRH - 0.25)^{0.5} + 0.56 \quad (8)$$

식 (8)은 ogive 노즈의 성능 계수를 구하는 식으로, CRH는 노즈의 caliber radius head를 뜻하며, 노즈의 호 부분의 반지름을 직경으로 나눈 값이다. Fig. 2에서는  $s/2a$ 로 정의된다.

2.2 Young의 방정식에 필요한 가정

Young의 방정식은 지면에 수직으로 침투하는 포탄의 투과 깊이만을 예상할 수 있고, 복잡한 관통자 형상이나, 지면 조건, 내충 조건 등에 대해서는 식의 적용이 어렵다는 단점이 있고 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 관통자는 침투 중에 변형이 발생하지 않는다.
- 관통자는 직선으로만 이동한다.
- 충돌 속도의 상한은 1,220m/s이다.
- 지면의 두께는 관통자의 지름의 3배보다 커야 한다.
- 공기, 물에 대한 침투는 고려되지 않았다.
- 금속, 세라믹의 재료에는 적용할 수 없다.

3. 기존 연구 사례와 해석 결과 비교

3.1 흙 재료에 대한 수직 충돌

경험식을 기반으로 한 Young 식의 흙 재료에 대한 검증 실험을 수행하였다. 흙 재료의 수직 충돌에 대하여 Forrestal 등<sup>(11)</sup>이 수행한 연구 결과와 Young 식의 해석 결과를 비교하였다. 관통자의

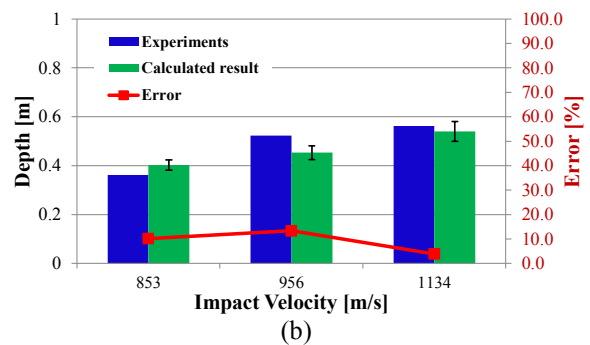
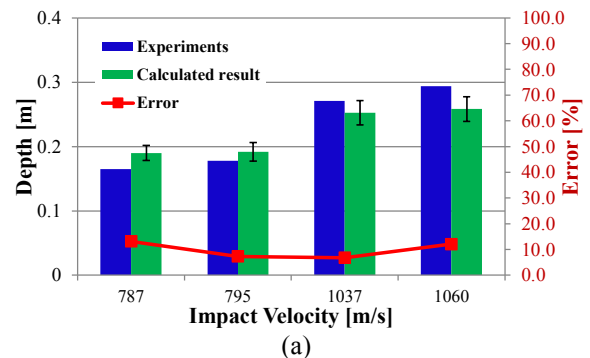


Fig. 3 Comparison of penetration depth of rock material: Diameter of projectiles are (a) 7.11; (b) 12.7 mm

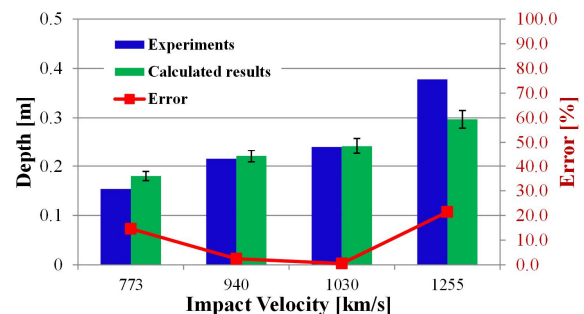


Fig. 4 Comparison of penetration depth of rock material in 15° oblique penetration

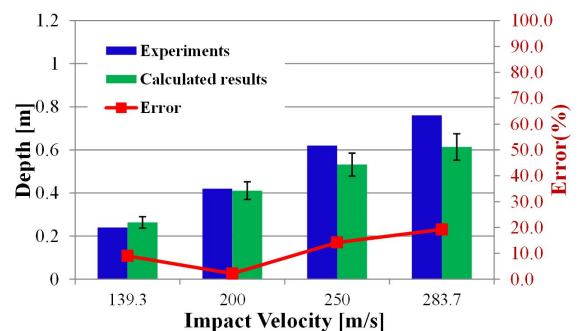


Fig. 5 Comparison of penetration depth of concrete material

총 길이는 674mm이며, 자세한 형상은 Fig. 2와 같다. 관통자 형상은 ogive 형상이며, CRH는 3이

다. 총 부피는  $0.0172\text{m}^3$ 이며, 무게는  $23.1\text{kg}$ 이다. 기존 연구 결과에서 충돌 속도가  $280\text{m/s}$ 일 때의 투과 깊이는  $5.18\text{m}$ 이다. 흙의 물질 변수를  $S=4.5$ ,  $K_s=1$ 로 한 경우 침투 깊이는  $4.981\text{m}$ 로 실제 실험과  $3.84\%$  차이로  $5\%$  내의 오차를 갖는 것을 알 수 있다.

### 3.2 암석 재료에 대한 충돌 특성

암석 재료에 대한 검증 모델은 Warren 등<sup>(12,13)</sup>의 연구 결과를 사용하였다. 관통자의 형상은 해당 연구 결과와 동일한 형상을 적용하였으며, 암석 재료의 특징으로  $Q(\text{quality of rock})$ 는  $0.9$ ,  $f'_c$ 는  $60\text{MPa}$ 를 적용하였다. 식 (4)에 따라 암석 재료의  $S$ 는  $0.815$ 이다. Fig. 3~5에서 오차 막대는 계산 결과에서  $10\%$  오차에 따른 허용 범위를 보여준다.

#### 3.2.1 암석 재료에 대한 수직 충돌

해석에서 관통자의 직경이  $7.11\text{mm}$ ,  $12.7\text{mm}$ 일 때, 수직 충돌에서 충돌 속도에 따른 투과 깊이를 비교하였다. 해석 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)와 같이 직경이  $7.11\text{mm}$ 인 경우,  $787\text{m/s}$ 에서 실험 결과와 계산 결과가  $13.11\%$ 의 오차를 보이며,  $1,037\text{m/s}$ 에서  $6\%$ 로 가장 낮은 오차를 보였다. 그리고  $1,060\text{m/s}$ 에서는  $12.11\%$ 로 오차가 증가하였다. Fig. 3(b)와 같이 직경  $12.7\text{mm}$ 에서는  $1,134\text{m/s}$ 에서  $3\%$ 로 가장 낮은 오차를 보였다.

#### 3.2.2 암석 재료에 대한 경사 충돌

관통자의 직경이  $7.11\text{mm}$ , 충돌 각도가  $15^\circ$ 일 때, 경사 충돌에서 충돌 속도에 따른 해석 결과를 비교하였다. 해석 결과와 실험 결과의 비교는 Fig. 4와 같다.  $15^\circ$  경사 충돌에서도 충돌 각도가  $0^\circ$ 인 수직 충돌과 같이 약  $800\text{m/s}$  이상의 충돌에서 좋은 예측 정밀도를 보인다.  $853\text{m/s}$ 의 경우 오차  $13.11\%$ 이며,  $940\text{m/s}$ ,  $1,030\text{m/s}$ 에서는 오차가 각각  $2.49\%$ ,  $0.54\%$ 로 매우 정확하게 예측하는 것을 알 수 있다. 하지만  $1,255\text{m/s}$ 에서는 오차가  $21.46\%$ 로, 속도가 증가함에 따라 오차가 증가한다.

### 3.3 콘크리트 재료에 대한 수직 충돌

다음 해석 결과는 콘크리트 재료에 대한 해석 결과이다. 해석은 Forrestal 등<sup>(14)</sup>의 연구 결과를

사용하여 비교하였다. 관통자의 질량은 약  $13\text{kg}$ 이며,  $CRH$  값은  $3$ 이다. 해당 연구 결과에서 콘크리트 재료의  $S$ 값에 대한 자료가 부족하여 기본 값인  $0.9$ 로 가정하였다. 해석 결과는 Fig. 5와 같다. 해석 결과에서 충돌 속도  $200\text{m/s}$ 에서 오차  $2.19\%$ 로 가장 낮은 값을 보였다. 이 경우를 제외하고는 최대  $18.19\%$ 의 오차를 보였다.

### 3.4 해석 결과에 대한 고찰

앞의 결과를 볼 때, 실험식을 사용한 관통자의 침투 깊이 예측은 일정 속도 범위에서는 높은 정밀도로 투과 특성을 예측할 수 있었다. 하지만 낮은 속도 또는 높은 속도 범위에서는 약  $20\%$  내외의 오차를 보이는 것을 확인하였다.

암석 재료에 대한 경사 충돌에서, 관통자의 속도가 증가함에 따라, 경사 충돌에서는 관통자에 굽힘 변형이 발생한다. 이때, 관통자는 J형상으로 이동한다.<sup>(15)</sup> 실험식을 기반으로 한 해석 모델에서는 관통자의 변형 및 J-hook 형상으로서의 관통자의 이동을 예측할 수 없기 때문에, 빠른 속도에서의 오차가 증가한다.

해석에서 가장 중요한 변수는 S-number이다. 이는 관통자가 침투하는 재료의 물성에 영향을 받는다. 또한 탄두의 속도에 따른 지질의 물성, S-number의 관계에 대한 연구가 부족하다. 일반적으로 실험을 통해 구할 수 있는 변수(압축 강도, 전단 강도 등)에 따라 S-number를 구할 수 있다면 일반적인 지질 재료에 대해서도 쉽게 계산할 수 있을 것으로 판단되며, 현재 이에 대한 연구를 수행 중이다.

## 4. 실험 결과와 해석 결과 비교

실험식을 사용한 관통자의 침투 성능 분석 방법을 실제 실험과 비교하였다. 실험은 국방과학연구소에서 실시하였다. 본 연구에서는 새보(sabot)를 포함하여 최대 직경  $60\text{mm}$ 의 발사체를 가스 건을 통해 발사하는 방식을 사용하였다. 이는 발사체 가속을 위한 구동 매체인 고압 질소를 충전 후, 발사체 뒷면에 순간적으로 시험 압력을 인가하여 발사하는 방법이다. 압력 챔버에 발사체를 장입한 후 압력을 인가하면 발사체가 포신을 따라 이동하고 표적이 설치되어 있는 대용량 진공 챔버에서 충돌 및 관통 시험을 하였다.

흙 단층 관통 실험과 흙 단층 침투 실험의 결



Fig. 6 High speed camera setting

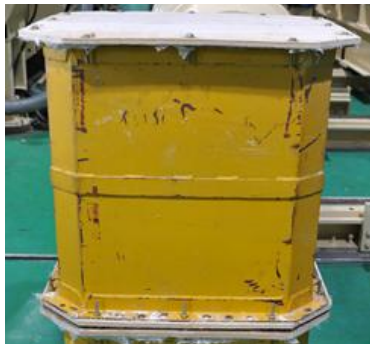


Fig. 7 Soil target used in experiment

과를 해석 결과와 비교하였다. 흙 단층 관통 실험의 경우 충돌 후 표적을 투과하여 나온 후의 잔류 속도를 비교하였고, 흙 단층 침투 실험의 경우 침투 깊이를 비교하여 해석 결과와 비교하였다. 또한 해석 결과의 민감도를 분석하기 위해 S-number가 10% 변화할 때의 편차 속도와 편차 침투 깊이를 도시하였다.

Fig. 6은 두 대의 고속카메라를 가스건 시험기에 설치한 모습이며 각각 발사체가 충돌하기 전의 속도, 표적 관통 후 잔류 속도를 측정한다. 20,000fps의 속도로 촬영한 카메라 영상을 분석하여 발사체의 속도를 측정하였다. 고속카메라는 FASTCAM SA1.1, SA-X2(Photron) 장비를 사용하였다.

표적은 카올리나이트, 표준사, 조사, 물로 구성된 식양질이며 Fig. 7과 같이 제작되었다. 식양질은 철재 케이스(가로, 세로, 높이 600mm)에 채워서 KS 규격의 다짐 시험을 통해 제작되었다. 측정된 밀도는 1.9g/cc이고, 함수율은 21.3%이다. 식양질은 카올리나이트, 표준사, 조사의 무게 비율이 각각 55, 30, 15%로 카올리나이트의 비중이 높기 때문에 지질 특성이 clay에 가깝다고 판단하였다. 따라서 Table 1을 통해 식양질의 S-number

Table 2 Comparison of residual velocity between experiment and Young's equation in perforation test

No.	Impact velocity [m/s]	Residual velocity (exp.) [m/s]	Residual velocity (Young) [m/s]	$\pm 0.1$ S deviation [m/s]	Error [%]
1	131.7	118.2	119.3	1.36	0.92
2	125.5	115.1	112.9	1.39	1.91

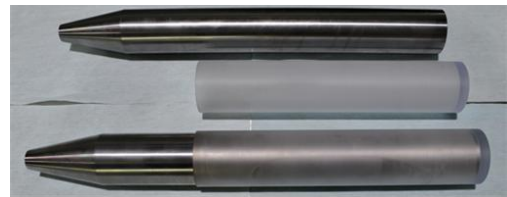


Fig. 8 Shape of projectile and sabot used in perforation experiment

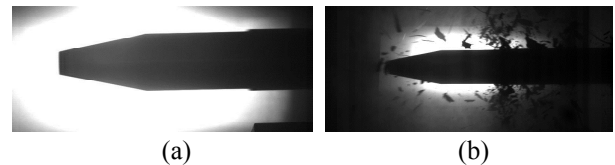


Fig. 9 Shape of projectile in perforation experiment pictured (a) before impact; (b) after impact

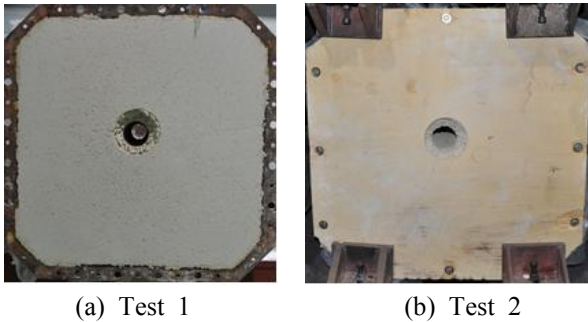
를 20으로 가정하였다.

#### 4.1 흙 단층 관통 실험

흙 단층 관통 실험의 관통자는 Fig. 8과 같으며 blunted 노즈 형상으로 직경 60mm, 질량 4.66kg (새보 포함, 새보 질량: 74g)이다. 탄체는 HRC35 이상의 강으로 제작되었다.

흙 단층 관통 실험은 동일한 토양 표적에 대하여 총 두 번의 관통 시험을 수행하였다. 두 번의 시험 모두 관통자가 표적을 관통하였기 때문에 충돌 후 표적을 투과하여 나온 후 속도를 비교하였다. Fig. 9는 고속카메라로 촬영한 표적 관통 전과 관통 후의 관통자 형상이다. Fig 10은 표적 관통 후 토양 표적의 형상을 보여준다.

시험 결과와 해석 결과는 Table 2와 같으며 잔류 속도는 초기 충돌 속도 대비 8~10% 정도 감소하였다. 양질 표적은 카올리나이트의 비중이 높아 점토와 같은 성질을 보이므로 관통 후에도 분진이 적게 발생하여 잔류 속도를 비교적 정확하게 측정할 수 있었다. 흙 단층 관통 실험의 경우 충돌 속도는 131.7m/s, 125.5m/s로 해석 결과와 실험 결과 투과 후 속도 오차는 0.92%, 1.91%로



(a) Test 1 (b) Test 2

Fig. 10 Shape of soil target after impact in the perforation test



Fig. 11 Shape of projectile used in penetration test



(a) Test 1 (b) Test 2

Fig. 12 Shape of soil target after impact in the penetration test

매우 정확하게 실험 결과를 예측할 수 있었음을 알 수 있었다. 기존 S-number가  $\pm 10\%$ 만큼 변화할 때의 결과 값과 기존 값의 차이를 나타내는  $\pm 0.1S$  편차도 각각 1.36m/s, 1.39m/s로 매우 작음을 확인하였다.

#### 4.2 흙 단층 침투 실험

흙 단층 침투 실험의 관통자는 Fig. 11과 같은 실린더형으로 직경 59.9mm, 길이 105mm, 질량 353.1g이다. 관통자는 폴리카보네이트(lexan)로 제작되었다. 표적 및 실험 조건은 흙 단층 관통 실험과 동일하다.

흙 단층 침투 실험은 관통 실험과 동일한 토양 표적에 대하여 총 두 번의 침투 시험을 수행하였다. 두 번의 시험 모두 관통자가 표적을 관통하지 못하였으므로 관통자의 침투 깊이를 비교하였다. Fig. 12는 관통자 침투 후의 관통자와 표적의

Table 3 Comparison of penetration depth between experiment and Young's equation in penetration test

No.	Impact velocity [m/s]	Penetration depth (exp.) [mm]	Penetration depth (Young) [mm]	$\pm 0.1 S$ deviation [mm]	Error [%]
1	182.4	246	223.1	22.61	9.31
2	174	221	210.79	21.36	4.62

형상을 보여준다.

1차 시험에서는 충돌 속도가 182.4m/s로 계측되었으며, 침투 깊이는 246mm이다. 전체 표적이 고정부 문제로 인하여 약 1cm 가량 뒤로 밀린 것으로 확인되었으며, 발사체 초기 에너지가 표적 침투 외에 표적을 이동시키는데 어느 정도 사용된 것으로 보인다. 즉, 표적이 완전히 고정되었다면 침투 깊이가 실험 결과보다 다소 증가했을 것으로 예상된다.

2차 시험에서는 충돌 속도 174m/s, 침투 깊이 221mm이며 가장 유효한 데이터로 판단된다. 발사체 침투 후 발사체 형상을 살펴보면 충돌 진행 방향에서 약 2도 오른쪽으로 표적에 박혀 있다. 흙 단층 침투 실험의 실험 결과와 해석 결과의 비교는 Table 3과 같다. 표적의 충돌 속도는 각각 182.4m/s, 174m/s이며, 침투 깊이는 246mm, 221mm, 해석 결과는 223.1mm, 210.79mm이다. 해석 결과와 실험 결과 오차는 9.31%와 4.62%로 모두 10% 내외의 오차에서 예측할 수 있었음을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 관통자의 지질 침투 성능을 분석하기 위해 Young의 방정식을 기반으로 한 해석 기법을 사용하였다. 이를 검증하기 위해 본 연구에 따른 해석 결과를 기존의 연구 결과와 비교하였다. 흙, 암석, 콘크리트에 대해 비교를 진행하였고, 일정 속도 범위에서는 높은 정밀도로 투과 특성을 예측할 수 있었다.

그리고 흙 단층 관통 실험과 흙 단층 침투 실험을 실시하였다. 관통 실험에서, 투과 후 속도 오차는 0.92%, 1.91%였고, 단층 침투 깊이 실험에서 오차는 9.31%와 4.62%였다. 두 경우 모두 탄두의 거동을 빠르고, 정확하게 예측할 수 있었다.

해석 결과에서 가장 큰 역할을 하는 변수는 지질의 S-number로, 지질의 S-number에 따라 투과

깊이가 크게 달라진다. 따라서 실험식을 사용한 침투 깊이 계산에서 해석의 정확도를 향상시키기 위해 지질의 종류 및 특징에 따라 S-number를 정확하게 예측할 수 있는 자료, 그리고 S-number에 대한 많은 데이터가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 정부의 재원으로 국방과학기술연구소(ADD, No. UE161102GD)의 지원을 받아 수행되었으며, 연구를 도와주신 국방과학기술연구소에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Ju, Y., Bae, S. and Yoo, Y., 2019, "A Study on Survivability Design of Normal Impact Penetrator," *Proc. of KIMST Annual Conference*, pp. 922~923.
- (2) Kim, S. and Yoo, Y., 2015, "Concrete Target Size Effect on Projectile Penetration," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 154~159.
- (3) Lee, J., Bae, S. and Yoo, Y., 2019, "Prediction of Concrete Penetration Based on Cavity Expansion Theory," *Proc. of KIMST Annual Conference*, pp. 969~970.
- (4) Yang, J., Ji, H. and Ha, D., 2017, "Penetration Prediction of Multiple Warhead System by Numerical Methods," *Proc. of KIMST Annual Conference*, pp. 1000~1001.
- (5) Huang, W., Sheng, D., Sloan, S. W. and Yu, H. S., 2004, "Finite Element Analysis of Cone Penetration in Cohesionless Soil," *Computers and Geotechnics*, Vol. 31, No. 7, pp. 517~528.
- (6) Tolooiyan, A. and Gavin, K., 2011, "Modeling the Cone Penetration Test in Sand Using Cavity Expansion and Arbitrary Lagrangian Eulerian Finite Element Methods," *Computers and Geotechnics*, Vol. 38, No. 4, pp. 482~490.
- (7) Gama, B. A. and Gillespie Jr., J. W., 2011, "Finite Element Modeling of Impact, Damage Evolution and Penetration of Thick-section Composites," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 181~197.
- (8) Talebi, H., Wong, S. V. and Hamouda, A. M. S., 2009, "Finite Element Evaluation of Projectile Nose Angle Effects in Ballistic Perforation of High Strength Fabric," *Composite Structures*, Vol. 87, No. 4, pp. 314~320.
- (9) He, T., Wen, H. M. and Qin, Y., 2008, "Finite Element Analysis to Predict Penetration and Perforation of Thick FRP Laminates Struck by Projectiles," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 1, pp. 27~36.
- (10) Young, C. W., 1997, *Penetration Equations*, Report No. SAND97-2426, U.S. Department of Energy.
- (11) Forrestal, M. J. and Luk, V. K., 1992, "Penetration into Soil Targets," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 427~444.
- (12) Warren, T. L., 2002, "Simulations of the Penetration of Limestone Targets by Ogive-nose 4340 Steel Projectiles," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 475~496.
- (13) Warren, T. L., Hanchak, S. J. and Poormon, K. L., 2004, "Penetration of Limestone Targets by Ogive-nosed VAR 4340 Steel Projectiles at Oblique Angles: Experiment and Simulations," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, No. 10, pp. 1307~1331.
- (14) Forrestal, M. J., Frew, D. J., Hickerson, J. P. and Rohwer, T. A., 2003, "Penetration of Concrete Targets with Deceleration-time Measurements," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 479~497.
- (15) Yoo, Y. H., Kim, J. B. and Lee, C. W., 2019, "Effects of the Projectile Geometries on Normal and Oblique Penetration Using the Finite Cavity Pressure Method," *Applied Sciences*, Vol. 19, No. 8, Paper No. 3939.