

## 탄두의 콘크리트 관통 시 스케일 영향

김석봉<sup>1)</sup> · 이창수<sup>1)</sup> · 유요한<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제4기술연구본부

### Scale Effects of Warhead on Concrete Penetration

Seokbong Kim<sup>1)</sup> · Changsoo Lee<sup>1)</sup> · Yohan Yoo<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 27 June 2016 / Revised 18 November 2016 / Accepted 24 February 2017)

#### ABSTRACT

This paper deals with the scale effects of warhead on concrete penetration. We investigated the scale effects using finite element analysis and Young's penetration equation. As the scale of penetration test decreases, the strain rate effects of target increases, and then strength of concrete target increases. This means the residual velocity and penetration depth of warhead decreases as the test model size decreases. Young's penetration equations are transformed with various penetrator mass and scale cases as a function of scale ratio. Penetration distance and residual velocity are not simply changed by the geometric scaling law.

Key Words : Scale Effects(스케일 영향), Penetration Equation(관통식), Concrete(콘크리트), Residual Velocity(잔류속도), warhead(탄두)

#### 1. 서론

일반적으로 동일한 형상의 발사체에 대하여 축소된 모델로 시험을 수행한다면 비교적 저렴한 비용으로 여러 번의 시험을 수행할 수 있다. 비교적 저가로 시험의 재현성 및 정확성을 신뢰성 있게 확인 할 수 있는 장점이 있으므로 스케일 효과에 대한 고려가 필요하다. 일반적으로 탄두 및 표적의 스케일이 작아지면 기하학적 스케일 규칙에 의하여 관통속도는 동일하며 시

간 및 거리가 스케일 비로 감소한다. 하지만 1/10 이상 큰 폭으로 스케일이 감소한다면 변형률속도 영향에 의하여 작은 스케일에서 폴스케일 대비 표적의 강도가 더 크게 증가되어 잔류속도 또는 관통거리가 감소된다<sup>1)</sup>. 또한 스케일 시험에서는 관통시간이 짧아지므로 탄두가 겪게 되는 파손량(damage) 누적 시간이 짧아지기 때문에 완성탄에 비하여 생존성이 과대평가되는 경향이 있다. 재료의 파손은 절대 시간에 선형 또는 지수 함수로 비례하기 때문에 관통시간이 긴 폴스케일 시험에서 생존성 측면에서 더 취약할 수 있다는 의미이다. 본 연구에서는 이러한 스케일 영향을 고려한 탄두 관통성능을 수치해석과 Young이 제안한 관

\* Corresponding author, E-mail: yyh1986@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

통식을 이용하여 평가한다.

## 2. 유한요소해석을 이용한 스케일 영향 분석

### 2.1 모델링 및 해석조건

본 연구에서는 Forrestal 등(2003)의 논문에서 사용된 발사체의 형상을 이용하여 해석을 수행하였다.<sup>[2]</sup> 발사체의 형상은 Fig. 1과 같으며 최대직경 80 mm, 무게 12.65 kg 이다. 3차원 요소로 모델링 하였으며 발사체 및 콘크리트(5080 psi, 두께 230 mm)의 요소 크기를 동일하게 부여하였다. 발사체 및 표적은 Fig. 2과 같으며 발사체가 340 m/s로 표적을 수직 관통하는 해석으로 상용 프로그램인 LS-DYNA 3D v.971를 사용하였다. 발사체에 사용한 물성은 Table 1과 같으며 탄체(case)는 4340 강이고 내부에 배터리 팩 및 가속도측정 장치가 포함되어 있다. 콘크리트의 물성은 LS-DYNA에서 제공하는 물성을 적용하였다. 기본적으로 DYNA에서는 변형률속도를 고려하지 않은 정적에서의 물성이 제공되나 본 연구에서는 구조물의 충돌/방폭/폭발과 관련된 연구를 주로 수행하는 미국의 K&C(Karagozian & Case)사에서 제공받은 변형률속도 별 물성 및 EOS (equation of state: 상태방정식) 데이터를 추가적으로 적용하였다<sup>[4,5]</sup>. 변형률속도가 증가함에 따라 콘크리트 강도가 증가하며 강도가 높은 콘크리트 일수록 변형률속도에 둔감한 특징을 보인다. 이러한 특징은 일반적인 강(steel)과 유사한 특징으로 볼 수 있다. 발사체의 경우 대변형이 없으므로 변형률속도를 고려하지 않았으며 콘크리트 eroding 값은 Mat\_add\_erosion 모델을 사용하여 0.2 ~ 0.3의 값을 사용하였다. 1/1(직경 80 mm) 및 1/10(직경 8 mm) 스케일 해석에서 콘크리트 표적

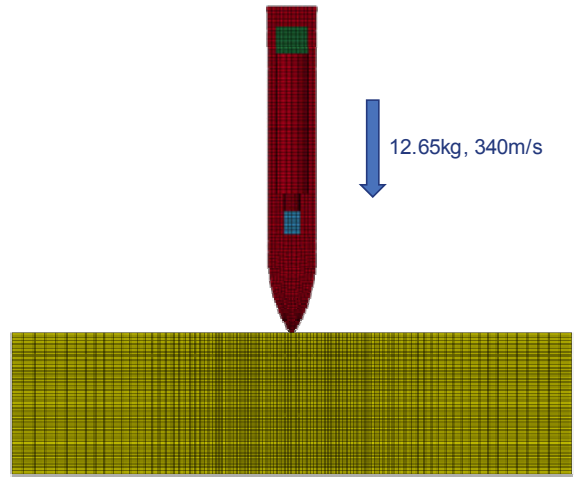


Fig. 2. F.E. modeling

Table 1. Material parameters for projectile

Material	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	E [GPa]	Yield stress [MPa]	Hardening Modulus [MPa]
Case (4340 steel)	7.82×10 <sup>3</sup>	207	1240	1660
Millipen (plastic)	2.05×10 <sup>3</sup>	6.89	34.5	0.00689
Battery pack (Al)	2.67×10 <sup>3</sup>	68.9	483	689

물성을 적용하여 변형률속도를 무시한 경우와 고려한 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

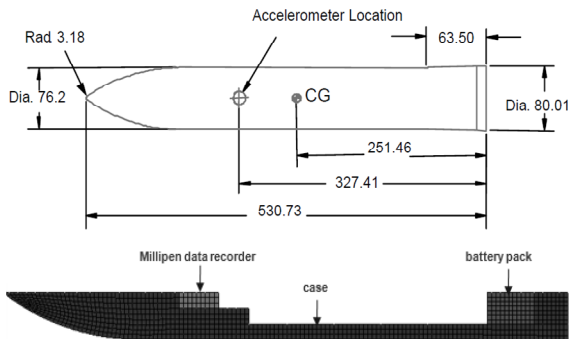


Fig. 1. Geometry for projectile, dimension in mm

### 2.2 해석결과

콘크리트 물성에 변형률속도를 고려하지 않은 경우 해석결과는 Fig. 3(a), 4(a)과 같다. 1/1과 1/10에 대하여 콘크리트의 정적 물성만 입력한 경우 관통 후 표적 형상 및 잔류속도에 거의 차이가 없다. 전체 해석 시간의 경우 1/1에서 3 ms, 1/10에서 0.3 ms로 스케일이 작아질수록 관통시간이 스케일에 비례하여 짧아지며 표적물성에서 변형률속도를 고려하지 않으므로 사실상 동일한 해석이라고 볼 수 있으며 단순히 요소 크기만 줄인 해석이라고 볼 수 있다.

콘크리트 물성에 변형률속도를 고려한 경우 해석결

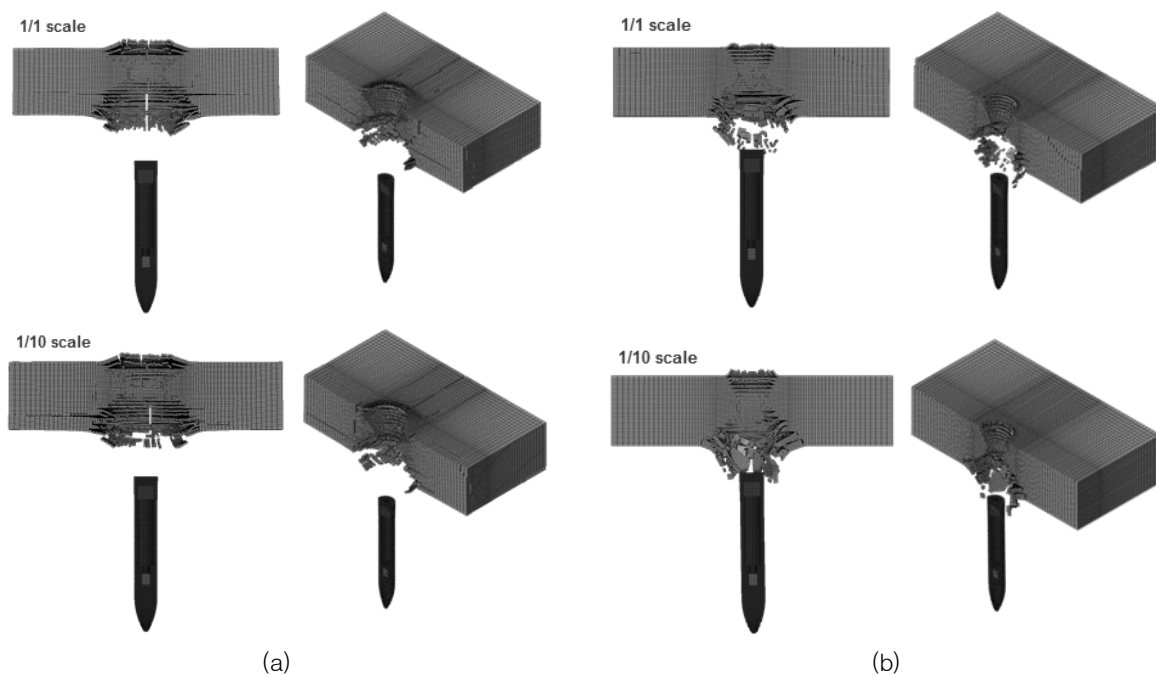


Fig. 3. F. E. result; (a) w/o strain rate effects, (b) with strain rate effects

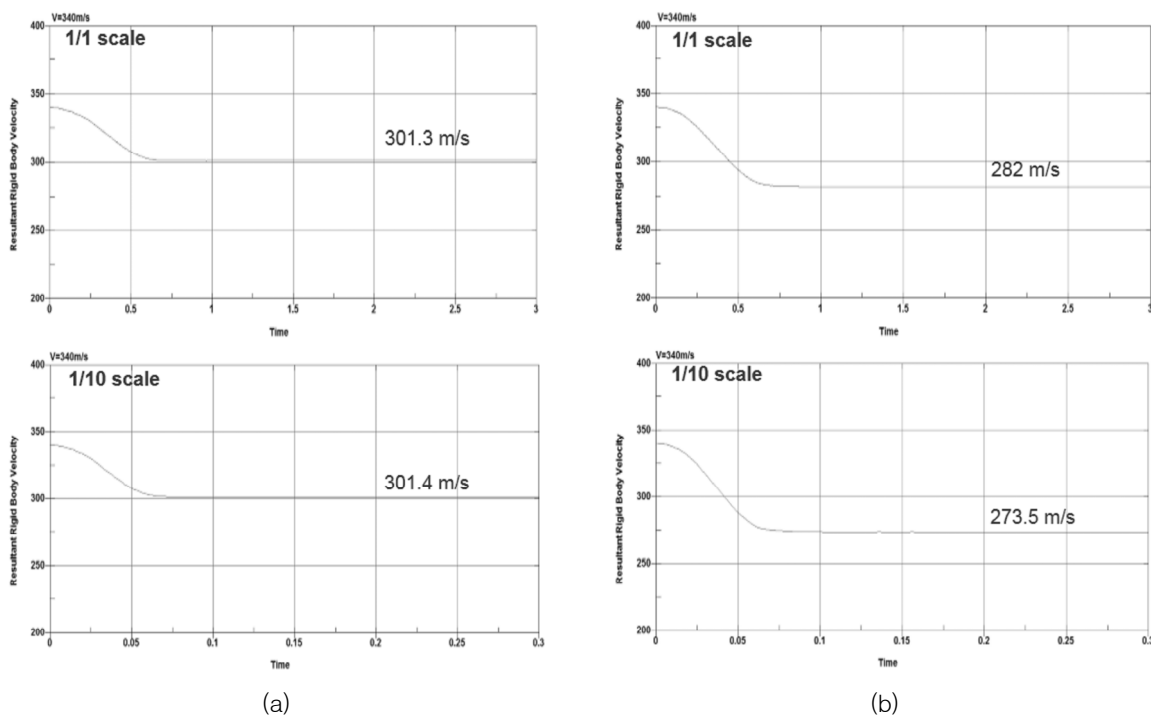


Fig. 4. Velocity[mm/msec] - time[msec] relations; (a) w/o strain rate effects, (b) with strain rate effects

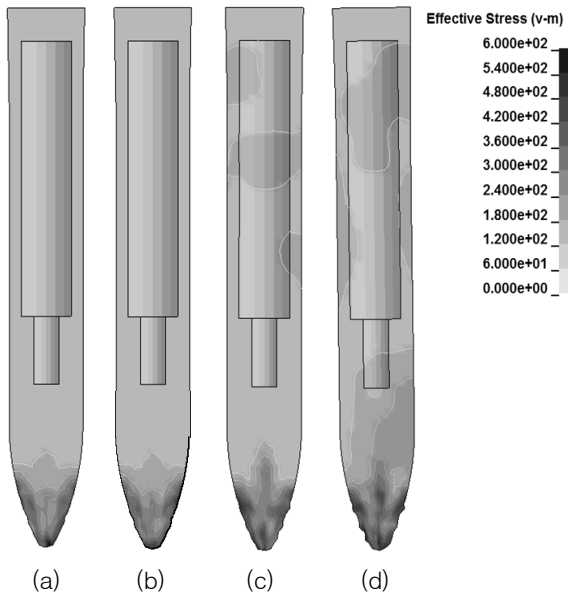


Fig. 5. Distribution of Von Mises Stress ; (a) w/o strain rate effects; 1/1 scale, (b) 1/10 scale (c) with strain rate effects; 1/1 scale, (d) 1/10 scale

과는 Fig. 3(b), 4(b)과 같다. 1/1과 1/10에 대하여 콘크리트의 변형률속도를 고려한 물성을 입력한 경우 관통 후 표적 형상에서 차이를 보인다. 동일한 1/1에서 해석한 결과에서도 변형률속도를 고려한 경우 변형률속도를 무시한 해석에 비하여 표적의 구멍이 작으며 표적 저항력이 증가하여 잔류속도가 301.3 m/s에서 282 m/s로 감소함을 알 수 있다. 1/10로 스케일을 줄인 경우에는 상대적으로 관통시간이 짧아져서 변형률속도가 더 증가하여 273.5 m/s까지 잔류속도가 감소하며 콘크리트 파손 형상 또한 다름을 알 수 있다. 이와 같이 동일한 모델링 조건에 대하여 물성 입력 시 변형률속도를 무시한 경우와 고려한 경우에 따라 약 10%의 잔류속도 차이 및 관통형상에서도 큰 차이를 보인다. Fig. 5는 관통 후 탄체의 유효응력 분포이다. 변형률속도를 고려하지 않은 해석(a, b)에서는 노즈부의 응력분포가 스케일에 따라 차이가 없다. 변형률속도를 고려한 경우 표적의 저항력이 증가하여 응력분포가 (a), (b)에 비하여 더 넓게 분포하게 되며 1/10 스케일 (d)에서 응력이 가장 크고 넓게 분포 되어 있음을 알 수 있다. 1/1에서는 표적 변형률속도는 국부적으로 약 1000~2000/sec, 1/10에서는 5000/sec 이상 발생하였으며

이로 인한 표적 강도 및 저항력 증가의 원인으로 볼 수 있다. 표적의 변형률속도를 고려한 해석이 실제 시험조건과 더 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 실제로 1/10 스케일 시험을 수행 한 경우 잔류속도가 273.5 m/s가 나왔다면 1/1 스케일 시험에서는 관통성능이 더 향상되어 282 m/s로 나올 것이라 예측할 수 있다. 즉, 탄두가 표적대비 충분히 강하다면 작은 스케일에서 더 가혹한 조건으로 시험을 수행한 것이라 볼 수 있다. 결국 탄두의 생존성 문제를 논외로 한다면 축소 스케일 시험에서 탄의 제원(관통거리, 잔류속도 등)을 만족시킬 수 있다면 완성탄 시험에서 관통성능이 더 향상될 것이므로 탄두의 제원을 만족시킬 수 있을 것으로 보인다.

### 3. 관통식을 이용한 스케일 영향 분석

#### 3.1 관통식

관통자가 지질 재료 또는 콘크리트와 충돌한 후 침투거리 또는 관통 후 잔류속도를 평가하는 연구들이 많이 수행되어왔으며<sup>[6-9]</sup> 그중에서 관통관련 연구에서 자주 언급되는 모델로 Young이 제안한 관통식 (penetration equation)이 대표적이다<sup>[10-13]</sup>. 1967년 Sandia National lab.의 Young이 최초로 관통식을 제안하였으며 이후 1997년에 이르기 까지 식의 계수 및 적용범위 등의 수정이 이루어졌다. 1997년에 제안된 콘크리트 관련 관통식은 다음과 같다<sup>[13]</sup>.

For  $V \geq 61$  m/s:

$$D = 0.000018SN(m/A)^{0.7}(V-30.5) \quad (1)$$

For rock and concrete (hard target)

$$K_h = 0.46(m)^{0.15} \text{ if } m < 182 \text{ kg else, } K_h = 1.0 \quad (2)$$

(Eqn. (1) may not be applicable when  $m < 5$  kg)

D: Penetration distance, m

S: S-number, penetrability of target, dimensionless

N: Nose performance coefficient

m: Mass of penetrator, kg

A: Cross sectional area,  $m^2$

m/A: Weight to area,  $kg/m^2$

V: Impact velocity, m/s

$K_h$ : Correction factor for lightweight penetrator

충돌속도가 61 m/s 이상일 때 식 (1)을 적용하며 S값과 N, m/A로 관통거리 D를 계산할 수 있다. 표적의 S값을 정확하게 넣을 필요가 있으며, 노즈형상계수인 N의 경우 콘형, ogive 등 이상적인 형상에서 정의되기 때문에 복잡한 형상의 노즈 형상에서 정확한 값을 넣기 어려운 경향이 있다. 특이한 것은 관통거리가 단순한 기하학적 스케일비(geometric scaling)가 적용된다면  $(m/A)^{0.7}$ 의 지수가 “1.0” 이지만 제안된 관통식에서는 “0.7”의 값이 사용된다. 이는 관통자와 표적을 이용하여 스케일 시험을 수행할 경우 관통거리는 단순히 스케일 비를 따르지 않을 수 있음을 의미한다. 콘크리트 표적의 경우 식 (1)에 관통자의 스케일에 따른 보정계수인 식 (2),  $K_h$ 를 곱한다. 식 (2)는 무게 182 kg 이하에 대하여 적용되며 182 kg 이상에 대해서는 특별한 보정계수 없이  $K_h = 1.0$  을 적용한다. 이는 무게 182 kg 이하의 관통자에서는 관통거리가 감소할 수 있음을 의미한다. 즉 작은 스케일의 가벼운 관통자의 경우 콘크리트의 변형률속도 영향에 의하여 더 강한 표적으로 강도가 증가 되므로 관통거리가 줄어들 수 있음을 고려한 계수이다. 식 (2)에는 추가로 5 kg 미만의 관통자에 대해서는 관통식이 적용되지 않을 수도 있다는 내용이 포함되어 있다. 이러한 가벼운 관통자의 경우 관통식에 의한 관통거리가 잘 맞지 않을 수도 있음을 의미한다.

초기속도로 콘크리트를 관통한 후의 잔류속도를 계산하는 식도 Young에 의하여 제안되었다. 식은 아래와 같다.

For a layer of thick concrete:

$$V_{ex} = V[1-(T/D\sin\Theta-L_n/K_3)/D]^{0.5} \quad (3)$$

$V_{ex}$ : Exit velocity, m/s

$V$ : Impact velocity, m/s

$T$ : Target layer thickness, m

$\Theta$ : Impact angle, degrees

$L_n$ : Penetrator nose length, m

$K_3 = 2$ , for air over and under concrete layer

관통자의 직경 또는 노즈 길이보다 큰 표적을 두꺼운 (thick) 콘크리트라고 정의하고 식을 제안하였다. 콘크리트 양 면으로 다른 콘크리트 층이 없이 공기 일 경우  $K_3$ 는 2가 되며 이 식에서 중요한 변수는 관통거리인 D 임을 알 수 있다. 표적 및 관통자를 기하학적

스케일로 줄일 경우 T와  $L_n$ 은 스케일비로 줄어들지만 관통거리, D는 앞서 제안된 식 (1)로 계산되므로 단순히 스케일비로 줄어들지 않는다.

### 3.2 스케일 영향 분석

1/1 완성탄 탄두질량을 300 kg으로 가정하면 식  $K_h$ 는 1.0 이다. 이 탄두를 1/3, 1/8로 축소하면 질량은 각각 11.1 kg, 0.586 kg이 되며  $K_h$ 는 0.66, 0.4246이 된다. 하지만 1/8 축소탄의 경우 5 kg 미만으로 관통거리식이 잘 맞지 않을 수 있음을 고려하여 한다. 정리하면 Table 2와 같다. 식 (1)에 스케일보정계수, 탄두 질량 및 면적을 대입하면 완성탄에서의 관통거리가 D라면 1/3, 1/8 축소탄에서의 관통거리는 0.306D, 0.099D가 된다. 이는 축소비율인 1/3(0.333), 1/8(0.125) 보다 작은 값으로 실제 관통거리가 기하학적 스케일로 계산한 거리 보다 더 작아질 수 있음을 의미한다. 다시 말해 완성탄 관통시험 시 축소탄을 이용한 시험 결과 보다 더 우수한 관통성능을 보일 수 있다는 의미이다. 표적의 변형률속도를 고려하지 않는다면 스케일에 비례하여 관통거리가 감소하고 관통식 (1)에서의  $(m/A)^{0.7}$ 의 지수를 “1.0”로 대체하고 스케일보정계수를 무시하면 된다.

Table 2. Scale effects analysis list

탄두 스케일	질량, m	스케일보정 계수, $K_h$	관통깊이
1/1	300 kg	1.0	D
1/3(0.333)	11.1 kg	0.66	0.306D
1/8(0.125)	0.586 kg (5 kg 미만 관통자)	0.4246	0.099D

Young에 의하면 제안된 관통식은 실험식으로서 다수의 시험데이터를 기반으로 얻은 결과이므로 기하학적 스케일 규칙보다 충분히 신뢰할 만 하다고 기술하였다. 또한 작은 질량의 관통자의 경우에는 관통식이 적용되지 않을 수 있으므로 1/3 또는 1/4 이상의 비교적 큰 스케일 시험을 추천한다고 기술하였다. 기본 지침으로 기하학적 스케일 규칙을 따르는 것을 추천하며 관통식 자체의 정확도도 15 % 오차범위에 있으며 경우에 따라서 기하학적 스케일 규칙을 적용하여 관통성능을 예측하여도 크게 오차가 나지 않을 것이라고

기술하였다.

실제로 기하학적 스케일 규칙(지수: 1.0)을 적용한 경우와 관통식(지수: 0.7)을 적용한 경우 관통거리를 비교해보면 스케일보정계수의 영향을 고려하기 위하여 완성탄의 질량이 182 kg 이하(최소 탄무게: 5 kg, 이때의 최소 스케일비 1/3.31)라고 가정하면 관통식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 &5 \text{ kg} \leq m < 182 \text{ kg} \\
 D_1 &= K_n 0.000018SN(m/A)^{0.7}(V-30.5) \\
 &= (0.46m^{0.15})[0.000018SN(m/A)^{0.7}(V-30.5)] \\
 &= (0.46)(0.000018)SN(V-30.5)m^{0.15}(m/A)^{0.7} \\
 &= Xm^{0.15}(m/A)^{0.7}, \quad X = \text{const.}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

스케일비를  $r$  ( $r < 1$ , 1/2 스케일이면  $r = 0.5$ )이라고 두고 질량( $m$ ) 및 면적( $A$ )의 스케일 변화량(질량은 지수 3, 면적은 지수 2 비례)에 대입하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 m^* &= r^3m, \quad 5 \text{ kg} \leq m < 182 \text{ kg}, \quad 5 \text{ kg} \leq m^* < 182 \text{ kg} \\
 A^* &= r^2A \\
 D_1^* &= 0.46(m^*)^{0.15}[0.000018SN(m^*/A^*)^{0.7}(V-30.5)] \\
 &= 0.46(r^3m)^{0.15}[0.000018SN(r^3m/r^2A)^{0.7}(V-30.5)] \\
 &= Xm^{0.15}r^{1.15}(m/A)^{0.7} \\
 &= r^{1.15}D_1 \quad (5)
 \end{aligned}$$

스케일 시험에서 얻은 관통거리  $D_1^*$ 는 스케일비,  $r$ 의 1.15 지수에 비례함을 알 수 있다. 지수 1.15가 1.0이면 스케일 시험 관통거리는 완성탄의 관통거리에 기하학적 스케일에 비례함을 알 수 있다. 예를 들어 1/2 스케일 시험에서 축소탄의 관통거리가 500 mm라면 기하학적 스케일 규칙에 의하면 1/1 완성탄에서 관통거리는 1000 mm로 예상되지만 위의 관통식(완성탄질량 182 kg 미만 가정, 적용가능 최소스케일: 1/3.31)을 이용하면  $500/(1/2)^{1.15} = 1110 \text{ mm}$ 로 기하학적 스케일에 비하여 약 11 % 관통성능이 향상될 것으로 예측된다. 1/4 스케일 시험을 가정하면 이때의 관통거리가 500 mm라면 기하학적 스케일 규칙에 의해 1/1 완성탄에서는 2000 mm 예상되며, 관통식을 적용하면  $500/(1/4)^{1.15} = 2462 \text{ mm}$ 로 23 % 향상되는 것으로 예측된다. 하지만 완성탄이 182 kg이라고 가정하여도 1/4 스케일에서 탄은 5 kg 미만으로 식의 범위를 벗어나므로 예측값에 오차가 있음을 고려하여야 한다.

결국 동일한 스케일에서 관통식에서 얻은 결과가 스

케일 규칙에서 얻은 거리에 비하여 항상 낮게 나타나므로 완성탄으로 환산하면 관통식을 적용한 결과가 항상 높게 예측된다. 따라서 안전계수의 측면으로 본다면 오히려 기하학적 스케일 규칙을 적용한 경우가 더 신뢰성 있는 설계를 할 수 있다는 장점이 있으나 과대 설계라는 단점도 가지고 있다.

완성탄의 질량이 182 kg 이상이며 축소 스케일에서는 182 kg 미만일 경우에는 스케일보정계수 때문에 관통식의 적용이 조금 복잡해진다. 이 경우 스케일 비로 줄인 경우에는 관통식에  $K_n = 0.46m^{0.15}$ 를 곱하고 완성탄에서는  $K_n = 1.0$ 을 적용하여야 하므로 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 m^* &= r^3m, \quad m \geq 182 \text{ kg}, \quad 5 \text{ kg} \leq m^* < 182 \text{ kg} \\
 D_2 &= 0.000018SN(m/A)^{0.7}(V-30.5) \\
 &= Z(m/A)^{0.7}, \quad Z = \text{const.} \\
 D_2^* &= 0.46(m^*)^{0.15}[0.000018SN(m^*/A^*)^{0.7}(V-30.5)] \\
 &= 0.46(r^3m)^{0.15}[0.000018SN(r^3m/r^2A)^{0.7}(V-30.5)] \\
 &= 0.46Zm^{0.15}r^{1.15}(m/A)^{0.7} \\
 &= 0.46m^{0.15}r^{1.15}D_2 \quad (6)
 \end{aligned}$$

Young의 관통식을 이용한 잔류속도 식은 다음과 같다. 콘크리트 표적 한 장(양쪽에는 공기층)에 수직으로 입사하고 관통한 후 잔류속도를 가진다고 가정한다. (완성탄질량 182 kg 미만 가정, 적용가능 최소스케일: 1/3.31)

$$\begin{aligned}
 m^* &= r^3m, \quad 5 \text{ kg} \leq m < 182 \text{ kg}, \quad 5 \text{ kg} \leq m^* < 182 \text{ kg} \\
 V^* &= V, \quad T^* = rT, \quad L_n^* = rL_n \\
 D_1^* &= r^{1.15}D_1 \\
 K_3 &= 2 \\
 V_{ex} &= V[1-(T/\sin\Theta-L_n/K_3)/D_1]^{0.5} \\
 &= V[1-(T-L_n/2)/D_1]^{0.5} \\
 V_{ex}^* &= V^*[1-(T^*-L_n^*/2)/D_1^*]^{0.5} \\
 &= V[1-(rT-rL_n/2)/(r^{1.15}D_1)]^{0.5} \\
 &= V[1-(T-L_n/2)/(r^{0.15}D_1)]^{0.5} \\
 &= V\{1-[1-(V_{ex}/V)^2]/r^{0.15}\}^{0.5} \quad (7)
 \end{aligned}$$

관통식에 의하면 완성탄에서 초기속도  $V$ , 잔류속도  $V_{ex}$ 이면 축소스케일 탄에서 초기속도  $V^*$ 는  $V$ 와 동일하다고 할 때 잔류속도  $V_{ex}^*$ 는 위와 같이 스케일비  $r$ 의 함수로 정리된다. 기하학적 스케일 규칙에 의하면 잔류속도는 스케일비에 독립적이므로 완성탄 시험결과와

축소 스케일에서 얻은 잔류속도가 동일한 속도가 나올 것으로 예측된다. 그러나 위에서 정리된 Young의 관통식에 의하면 스케일비의 지수항 때문에 축소스케일 탄에서는 잔류속도가 더 작게 나오게 된다. 이는 결국 콘크리트 관통 시험 시 스케일 시험에서 얻은 잔류속도로 완성탄 잔류속도를 예측하는 경우 완성탄에서 더 높게 예측됨을 의미한다.

완성탄이 182 kg 이상이며 축소탄이 182 kg 이하인 경우에도 아래와 같이 잔류속도는 r의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 m^* &= r^3m, m \geq 182 \text{ kg}, 5 \text{ kg} \leq m^* < 182 \text{ kg} \\
 V^* &= V, T^* = rT, L_n^* = rL_n \\
 D_2^* &= 0.46m^{0.15}r^{1.15}D_2 \\
 V_{ex} &= V[1-(T-L_n/2)/D_2]^{0.5} \\
 V_{ex}^* &= V^*[1-(T^*-L_n^*/2)/D_2^*]^{0.5} \\
 &= V[1-(rT-rL_n/2)/(0.46m^{0.15}r^{1.15}D_2)]^{0.5} \\
 &= V[1-(T-L_n/2)/(0.46m^{0.15}r^{0.15}D_2)]^{0.5} \\
 &= V\{1-[1-(V_{ex}/V)^2]r^{0.15}/m^{0.15}/0.46\}^{0.5} \quad (8)
 \end{aligned}$$

완성탄을 이용한 관통시험을 대체하기 위하여 작은 스케일로 시험을 수행하는데 있어서 Young의 관통식을 적용한다면 스케일 시험에서 더 작은 관통거리 및 잔류속도가 나올 수 있음을 알 수 있다. 스케일이 작아질수록 이러한 경향이 커지며 스케일이 완성탄에 가까워질수록 이러한 차이가 작아진다. 결국 스케일 시험 후에 얻은 관통결과에 비하여 완성탄에서 더 높은 관통거리 및 잔류속도가 나올 것으로 예측되기 때문에 작은 스케일 시험이 탄의 운용조건을 만족시키기에 더 가혹한 조건임을 알 수 있다. 그러나 Young이 기술하였듯이 스케일 시험에서 일단 기준이 되어야 할식은 기하학적 스케일 규칙을 적용한 결과이므로 이 또한 무시할 수 없다. Young의 관통식과 기하학적 스케일 규칙 중 관통자의 관통 성능을 예측하는데 있어서 어느 것이 더 우수하다고 결론을 내리기에 무리가 있다. Young의 관통식을 적용할 때 변형률속도 증가에 따라 콘크리트 강도가 커지는 것을 감안하므로 작은 스케일에서의 관통성능에 비하여 완성탄에서 약 10 % 이상의 우수한 성능이 예측되기 때문에 추가적인 안전계수를 고려할 필요가 없다. 반면 기하학적 스케일 규칙을 적용하면 손쉽게 완성탄의 관통성능이 계산, 예측되며 변형률속도에 둔감한 콘크리트 표적에 대비하여 안전계수를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 여기서 주의해

야 할 것은 스케일탄 대비 완성탄의 관통성능이 더 높게 예측된다 하더라도 탄의 파손(failure)과 관련된 생존성 측면에서는 완성탄이 항상 안전할 것이라고 보장할 수 없다. 특히 관통 시 표적의 강도가 클 경우에는 탄체재료의 파단 시 고려되는 공극(void)의 생성(nucleation), 성장(growth)이 관통시간에 각각 선형, 지수함수에 비례하므로 완성탄이 파단에 더 취약할 수 있는 문제가 있다. 따라서 완성탄 시험에서 발생하는 막대한 비용을 대체하기 위하여 축소 스케일 시험을 고려하는 경우 가급적 1/2 또는 1/2.5의 비교적 완성탄에 비교적 가까운 시험과 1/4, 1/8 등 큰 폭의 축소 스케일 시험을 함께 고려하여 시험 한 후 생존성 및 관통성능을 평가하고 완성탄의 관통성능을 예측하는 것이 효율적일 것으로 보인다.

관통식을 이용한 스케일 영향 분석결과를 살펴보면 유한요소 해석을 이용한 분석결과와 유사한 경향을 살펴볼 수 있다. 스케일이 작은 시험에서 얻은 관통결과를 이용하여 스케일이 큰 시험을 예측할 경우 발사체의 관통성능이 더 향상될 것이라고 판단할 수 있다는 것이다. 유한요소 해석에서는 대표적인 인자로 표적의 변형률속도 고려 여부를 고려하여 이러한 경향을 평가하였다면 관통식의 경우 시험을 통하여 얻어진 경험식에 스케일 영향을 적용함으로써 동일한 경향을 파악할 수 있었다. 본 연구에서 유한요소에서 사용되었던 발사체 형상을 관통식에 직접 적용하지는 않았다. 참조논문에서 제시한 발사체의 질량이 12 kg 정도로 관통식에서 주로 다루는 고질량 탄두에 비하여 질량의 차이가 크며, 관통식 자체가 시험결과와 15 %의 편차가 있기 때문에 해석을 통한 관통식의 신뢰도 평가는 논외로 하였다. 본 연구에서는 특별한 전산 계산 없이 사용할 수 있는 관통식을 이용하여 시험 전에 스케일의 영향을 쉽게 파악할 수 있는 방안을 제시하며, 유한요소해석을 통한 정밀분석 시에는 표적의 변형률속도를 고려하여야 스케일 영향을 정확히 파악할 수 있음을 제안하였다.

#### 4. 결 론

스케일이 커질 경우 축소시험에 비하여 발사체 및 표적의 스케일이 커지면서 동일한 발사속도에 대하여 관통시간이 스케일 량에 비례하여 커지기 때문에 동일한 모델링을 수행하였다 하더라도 탄체의 거동에

차이를 보일 수 있다. 축소시험에서 발사체는 빠른 속도로 관통되기 때문에 표적의 변형률속도가 커지게 되므로 완성탄 시험에 비하여 변형률속도 측면에서는 가혹한 조건이라 볼 수 있지만 완성탄 시험의 관통시간이 스케일 량에 비례하여 커지기 때문에 파손 누적량은 시간에 비례하여 증가하게 된다. 결국 탄체가 받는 파손량 측면에서는 스케일이 커질수록 가혹한 조건이라 할 수 있다.

본 연구에서 콘크리트 표적이 변형률속도에 독립적이라고 가정한 경우 스케일에 따른 발사체의 잔류속도에는 큰 차이가 없었으며 표적의 변형률속도 영향을 고려하면 잔류속도가 감소하는 결과를 유한요소해석을 통하여 얻었다. 표적의 변형률속도 적용유무에 따른 영향을 파악함으로써 표적에 대한 속도 감소 정도를 정량적으로 평가하였으며 콘크리트의 동적물성의 필요성을 확인하였다.

Young이 제안한 관통식을 이용하여 스케일에 따른 관통거리 및 잔류속도 거동을 평가하였으며 기하학적 스케일 규칙을 적용한 결과와 비교하였다. 관통식은 실험식으로서 일반적인 기하학적 스케일 규칙과 다르게 표적의 변형률속도를 고려하여 제안된 것으로 보이며 이 때문에 스케일이 작아질수록 완성탄에 비하여 약 10 % 이상 관통거리가 작아지고 잔류속도가 감소하는 경향을 보인다. 그러나 관통식과 기하학적 스케일 규칙 중 관통자의 관통 성능을 예측하는데 있어서 어느 것이 더 우수하다고 결론을 내리기에 무리가 있다. 따라서 축소 스케일 시험결과를 이용하여 완성탄의 거동을 예측하는데 있어서 어느 정도 오차를 감안하여 평가하는 것이 바람직하며 가능한 다양한 축소 스케일을 선정하여 시험한 후 결과를 평가하는 것이 중요하다.

## References

- [1] C. E. Anderson Jr, S. A. Mullin and C. J. Kuhlman, "Computer Simulation of Strain-rate Effects in Replica Scale Model Penetration Experiments," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 13, No. 1, pp. 35-52, 1993.
- [2] M. J. Forrestal, D. J. Frew, J. P. Hickerson and T. A. Rohwer, "Penetration of Concrete Targets with Deceleration-time Measurements," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 28, pp. 479-497, 2003.
- [3] D. J. Frew, M. J. Forrestal and J. D. Cargile, "The Effect of Concrete Target Diameter on Projectile Deceleration and Penetration Depth," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 32, pp. 1584-1594, 2006.
- [4] L. J. Malvar, J. E. Crawford, J. W. Wesevich and D. Simons, "A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 19, No. 9/10, pp. 847-873, 1997.
- [5] L. J. Malvar and C. A. Ross, "Review of Strain Rate Effects for Concrete in Tension," *ACI Materials J.* Vol. 95, No. 6, pp. 735-739, 1998.
- [6] M. E. Backman and W. Goldsmith, "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," *Int. J. of Eng. Sci.*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-99, 1978.
- [7] J. T. Gomez and A. Shukla, "Multiple Impact Penetration of Semi-infinite Concrete," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 25, No. 10, pp. 965-979, 2001.
- [8] Q. M. Li and X. W. Chen, "Dimensionless Formulae for Penetration Depth of Concrete Target Impacted by a Non-deformable Projectile," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 28, No. 1, pp. 93-116, 2003.
- [9] C. Y. Tham, "Numerical and Empirical Approach in Predicting the Penetration of a Concrete Target by an Ogive-nosed Projectile," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 42, No. 14, pp. 1258-1268, 2006.
- [10] C. W. Young, "The Development of Empirical Equations for Predicting Depth of an Earth Penetrating Projectile," SC-DR-67-60, Sandia National Laboratories, 1967.
- [11] C. W. Young, "Empirical Equations for Predicting Penetration Performance in Layered Earth Materials for Complex Penetrator Configurations," SC-DR-72-0523, Sandia National Laboratories, 1972.
- [12] C. W. Young, "Equations for Predicting Earth Penetration by Projectiles: An Update, SAND88-0013," Sandia National Laboratories, 1988.
- [13] C. W. Young, "Penetration Equations," SAND97-2426, Sandia National Laboratories, 1997.