

침투자의 노즈 형상에 따른 콘크리트 침투성능 변화에 관한 수치적 연구

주용원[†]

Numerical Study on Variation of Penetration Performance into Concrete by Penetrator Nose Shape

Yongwon Ju[†]

ABSTRACT

In order to destroy the hard target, it is essential to develop a penetration warhead with high penetration performance. To design a penetration warhead, this paper discusses the effect of nose shape factors such that nose shape, nose length, nose tip diameter, on the penetration performance of the penetrator. AUTODYN-2D has been used to conduct the computational analysis. The experimental result of Forrestal, and a simulation result have been compared to verify the reliability of computational analysis. Computational results show that the nose length have more influence on the penetration performance than the nose shape. Furthermore, simulation results show that the penetration performance can be improved by increasing the nose tip diameter to a specific value, when the nose length of the penetrator is uniform.

Key words : Penetration, Nose shape, Nose parameter

요약

견고표적을 무력화하기 위해서는 높은 침투/관통성능을 가진 침투탄의 개발이 필수적이다. 침투탄의 설계를 위해, 본 논문에서는 노즈 형상 인자들이 침투자의 콘크리트 침투/관통성능에 미치는 영향을 분석하였다. 전산해석은 상용 전산해석 프로그램인 AUTODYN-2D를 사용하여 수행하였다. Forrestal의 시험결과를 사용하여 전산해석의 신뢰성을 검증하였으며, 침투자의 노즈 형상보다는 노즈 길이가 침투/관통성능에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 침투자의 노즈 길이가 일정할 경우, 노즈 팁 직경을 특정값까지 증가시켜 침투/관통성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

주요어 : 침투, 노즈 형상, 노즈 파라미터

1. 서론

정밀 유도무기의 정확도가 향상됨에 따라, 표적 명중 이후 표적의 파괴를 위한 탄두 기술이 중요한 과제로 대두되고 있다. 각종 미사일 보관 및 발사기지 등 표적의 보호 강도는 갈수록 견고해지고 있으며, 이러한 견고표적들의 실질적인 무력화를 위해서는 침투탄을 이용한 타격이 효과적이다.

대부분의 견고표적 파괴무기에서 사용되는 침투탄은 운동에너지만을 표적 침투/관통 에너지원으로 이용한다. 콘크리트 표적이며, 침투탄의 무게가 5kg 이상, 표적 충돌속도가 61m/s 이상일 경우, 침투탄의 침투/관통능력(D)은 다음과 같이 침투 실험식(Young, 1997)으로 표현 가능하다.

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

(S : S-넘버(S-number), N : 노즈 파라미터(Nose parameter), m : 탄두 중량, A : 탄두 평균 단면적, V : 표적 충돌속도)

침투탄의 무게에 따라 (1)식의 보정은 필요하며, 다음

Received: 22 June 2018, **Revised:** 20 August 2018,

Accepted: 5 September 2018

† Corresponding Author: Yongwon Ju

E-mail: jyongw@naver.com

Agency for Defense Development, Daejeon, Korea

의 K_h 값을 우변에 곱해주어야 한다.

$$K_h = 0.46 m^{0.15} \quad m \leq 182 kg$$

이외에는 $K_h = 1.0$

침투 실험식 (1)에서 침투탄의 침투/관통 능력은 노즈 형상에 의해 결정되는 노즈 파라미터 N 과 침투탄의 단면적 질량비(m/A) 그리고 침투탄의 표적 충돌속도 V 에 따라 결정된다. 침투탄의 단면적 질량비, 표적 충돌속도가 고정되어 있을 때, 침투 성능에 영향을 미치는 값은 노즈 파라미터 값이다. 노즈 파라미터 N 값은 다음 식 (2)와 같이 표현된다(Young, 1997).

$$N = K(L_n + L_n')/D + 0.56 \quad (2)$$

여기서 K 는 노즈 형상에 따라 바뀌는 상수값으로 오자이브(ogive) 형상일 때 0.09, 원뿔(conic) 형상일 때 0.125이다. L_n 은 노즈 팁(tip)이 뾰족하지(blunt) 않았을 때의 노즈 길이이며, L_n' 은 실제 노즈 길이이다(노즈 팁이 뾰족하지 않을 경우, $L_n = L_n'$). D 는 탄두 직경이다.

식 (2)를 통해 N 값에 영향을 미치는 인자는, 단면적 질량비가 고정됨에 따른 탄두 직경이 일정할 경우, 노즈 형상, 노즈 길이, 노즈 팁의 직경임을 알 수 있다.

N 값에 영향을 미치는 인자 중 노즈 형상에 관한 기존 연구(Chen and Li., 2002; Borvik et al., 2002; Borvik et al., 2002; Gupta et al., 2007; Kpenyigba et al., 2015),에서는 침투자의 노즈 길이를 고려하지 않고 원기둥, 반구, 원뿔, 오자이브 등 침투자의 노즈 형상만을 고려하여 침투자의 침투/관통 성능을 분석 모델과 시뮬레이션 그리고 실험으로 비교하였기 때문에 노즈 형상 뿐만 아니라 노즈 길이 및 노즈 팁의 직경이 침투/관통성능에 미치는 영향에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 유한 요소 해석 프로그램인 AUTODYN-2D로 침투해석을 수행하여, 언급한 노즈 형상 인자들이 침투자의 침투/관통 성능에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 이를 위해, 기존 논문 시험결과(Forrestal et al., 2003)를 이용하여 침투해석의 신뢰도를 검증하였으며, 노즈 형상, 노즈 길이 그리고 노즈 팁 직경에 따라 설계된 침투자에 대해 콘크리트 침투/관통성능을 분석하였다. 이러한 해석결과는 침투/관통성능 향상을 위한 침투탄의 노즈 형상을 설계하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

2. 해석 모델링 검증

노즈 형상 인자들이 침투자의 침투/관통 성능에 미치는 영향을 전산해석으로 분석하기 위해 먼저 침투해석의 신뢰도를 검증하였다. 노즈 형상 인자들을 도출해낸 침투 실험식 (1, 2)를 사용하기 위해서는 침투자의 질량이 5kg 이상이어야 한다. 이를 만족시키는 논문 결과(Forrestal et al., 2003) 중 하나를 해석 모델링 검증에 사용하였다.

침투 실험식 (1)을 통해 구한 침투/관통 깊이와 논문 시험결과 값(Forrestal et al., 2003) 중 오차가 10% 이내 인 결과를 검증을 위한 시험결과로 선정하였다. 선정된 시험결과의 침투자의 재질은 4340강(steel 4340)이고, 형상은 Figure 1과 같다.

표적은 39MPa 강도의 직경 및 높이가 1830mm인 실린더형 콘크리트이며 강판으로 외부를 둘러싸아서 콘크리트 반경방향으로의 변형을 구속하였다. 침투자의 표적 충돌속도는 456.4m/s이며, 콘크리트 표적의 침투 깊이는 0.94m이다(Forrestal et al., 2003).

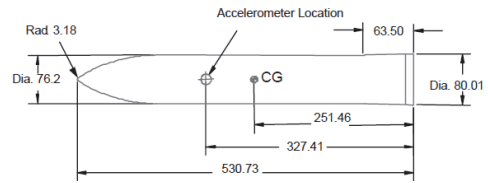


Fig. 1. Penetrator geometries

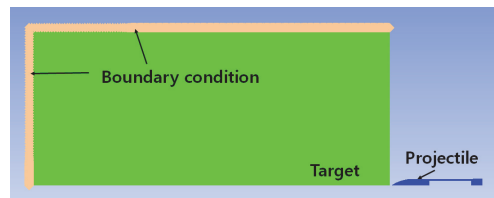


Fig. 2. Modeling and boundary condition

침투자와 표적을 Figure 2와 같이 간략하게 2D 축대칭 모델로 모델링하였다. 격자의 크기는 침투자 4 mm, 콘크리트 표적 2 mm로 2:1 비율이며, 콘크리트 표적은 논문실험 결과와 동일하게 돌레 및 하단부는 고정되어서 움직이지 않는다고 가정하였다. 침투자의 재료는 4340강으로, 침투자가 콘크리트 표적을 관통 시 대변형이 발생하지 않아 변형률이 낮고 완만하여 변형률 속도를 고려할 필요가 없기 때문에 침투자의 상태 및 압력을 기술하기 위해, 체적 탄성계수(Bulk modulus)만 고려하여 선형

상태방정식(Linear Equation of State, EOS)를 사용하였다(AUTODYN; LS-DYNA).

재료 모델은 쌍일차 경화(Bilinear Hardening) 재료모델을 사용하였다. 쌍일차 경화 재료모델은 선형탄성-선형소성 재료로서 Figure 3과 같이 소성영역에서 변형률-응력 관계가 곡선이 아닌 직선의 형태를 가지고 있다. 침투자의 재료 물성은 Table 1과 같다(Forrestal et al., 2003; Kim and Yoo., 2015).

Table 1. Material data for steel4340

Parameter	Value
Reference Density	7.85 g/cm ³
EOS - Linear	
Young's Modulus	200 GPa
Poisson's ratio	0.29
Bulk Modulus	158 GPa
Strength - Bilinear Hardening	
Shear Modulus	77.5 GPa
Yield Stress	1240 MPa
Tangent Modulus	2 GPa

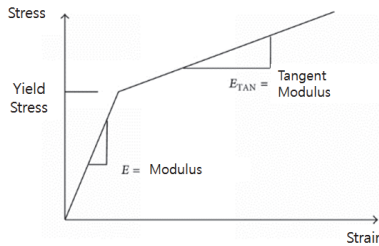


Fig. 3. Bilinear hardening material model

표적의 재료는 콘크리트로, 재료의 상태방정식은 높은 응력 수준에서 올바른 거동을 제공하며 낮은 응력 수준에서 압축 프로세스에 대한 세부 묘사가 가능한 P-alpha 상태방정식을 사용하였다(Herrmann, 1969; AUTODYN).

재료모델은 RHT 콘크리트 모델을 사용하였다(Riedel et al., 1999; Riedel et al., 2008; AUTODYN). RHT 콘크리트 모델은 압축에 의한 경화, 변형 경화, 압축 인장의 변형률 속도 경화, 전단에 의한 손상 등과 같은 비선형 거동을 표현할 수 있는 모델로서, 폭발하중 및 침투/관통 해석에 의한 콘크리트의 거동 분석 해석에 유용한 모델이다. 표적 콘크리트의 압축강도는 논문 시험(Forrestal et al., 2003)에 사용한 표적의 압축강도와 동일하게 39MPa

로 사용하였다.

전산해석에서 콘크리트 모델은 침투자가 침투/관통하는 동안, 격자에 큰 일그러짐이 발생하게 된다. 격자의 일그러짐은 전산해석의 시간 단계(time step)를 감소시켜 해석의 수행을 어렵게 만든다. 해석의 수행을 위해, 침식(erosion) 모델 중 지정한 특정 변형률이 발생하면 해당 격자를 제거해주는 즉각적인 기하학적 변형률(instantaneous geometric strain)(Beppu et al., 2008; Riedel et al., 2009; Hao et al., 2010; Nyström and Gylltoft, 2011)을 사용하여, 표적인 콘크리트 모델에서 큰 일그러짐이 발생한 격자를 제거해주었다.

콘크리트의 침식 값을 조정하여, 논문 시험결과 값(Forrestal et al., 2003)인 940mm와 오차가 10% 이내가 되도록 하였다. 기하학적인 변형률 값을 0.4 ~ 0.7로 조정하여 최종적으로 0.65값을 사용하였으며, 침투자의 침투깊이는 971mm로 오차는 약 3%이다.

전산해석 결과와 논문 시험결과(Forrestal et al., 2003)의 탄두 가속도 이력을 비교하기 위해, 논문 시험결과와 가속도계와 동일한 위치에서 가속도 이력을 측정하였다.

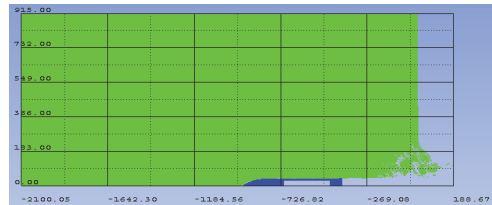


Fig. 4. Analysis result. Geometric strain = 0.65

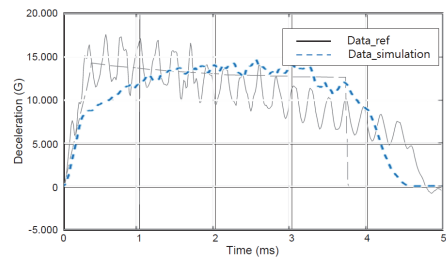


Fig. 5. Deceleration data.

(black : experiment result, blue : simulation result)

논문 시험결과에서 1ms동안의 가속도 파형의 피크(peak)개수를 추정하여 저역 통과 필터(low-pass filter)의 차단주파수(cut-off frequency)를 5kHz로 선정하고 전산해석 결과에 적용하였다. 결과는 Figure 5와 같으며 전산해석 결과와 시험결과 값은 유사한 경향을 보인다고

판단하였다. 이처럼 침투깊이 및 가속도 이력을 통하여 침투해석의 신뢰도가 검증된 모델로 노즈 형상 인자들이 침투/관통 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

3. 노즈 형상 인자 영향

3.1 노즈 형상 및 길이 영향

노즈 형상 및 길이에 의한 영향을 확인하기 위해 동일한 중량과 노즈 파라미터 값을 가지며, 노즈 형상 및 길이가 다른 침투자 3종을 Figure 6와 같이 설계하였다. 침투자 3종의 노즈 형상은 원뿔, 오자이브, 쌍원뿔(bi-conic) 형상이다. 쌍원뿔 형상의 경우, 두 원뿔 형상의 노즈 파라미터 값의 평균으로 전체 노즈 파라미터값을 계산하였다.

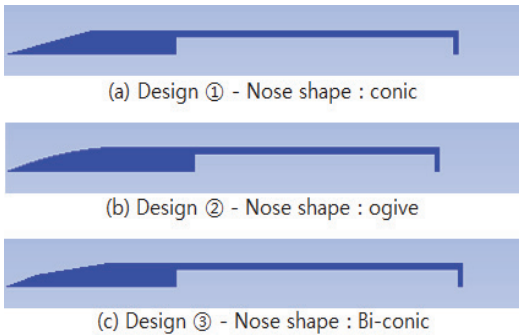


Fig. 6. Shape of designed penetrator

전산해석을 위해 침투자와 표적을 2D 축대칭 모델로 모델링하였으며, 콘크리트 표적은 돌레 및 하단부는 고정되어서 움직이지 않는다고 가정하였다. 전산해석에 사용된 침투자의 재질은 4340강으로 재료 물성치는 Table 1과 같고, 표적의 재료모델은 RHT 콘크리트 모델(Riedel et al., 2008; AUTODYN)로 압축강도를 39MPa로 사용하였다.

Table 2. Penetration depth of designed penetrator (Comparative standard : design ①)

Nose shape	Nose length L_n / Penetrator dia D	Penetration depth ratio
Conic Design ①	$L_n/D = 1.96$	1.00
Ogive Design ②	$L_n/D = 2.73$	1.08
Bi-conic Design ③	$L_n/D = 2.38$	1.06

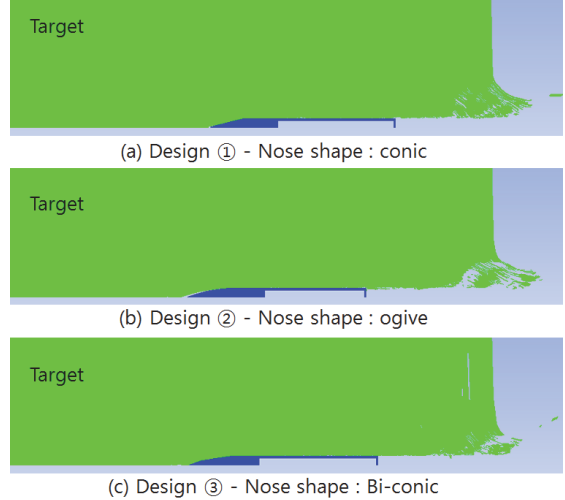


Fig. 7. Penetration shape by penetrator

전산해석 결과는 Figure 7, Table 2와 같다. 동일 노즈 파라미터 값을 가짐에도 불구하고, 침투자의 침투깊이는 원뿔, 쌍원뿔, 오자이브 형상 순으로 증가하였다. 원뿔, 쌍원뿔, 오자이브 형상 순으로 노즈 형상 상수값 K 는 감소하며, 노즈 길이는 증가하기 때문에 침투깊이는 상대적으로 노즈 형상보다 노즈 길이에 영향을 더 받는 것으로 판단된다.

이를 확인하기 위해, 노즈 길이가 동일하고 노즈 형상이 다른 침투자를 설계하고 침투깊이 경향을 비교하였다. 노즈 길이는 쌍원뿔 침투자의 노즈 길이로 선정하였으며, 노즈 형상은 원뿔과 오자이브 형상으로 선정하였다. 전산해석 결과는 Table 3과 같다.

동일 노즈 길이일 때, 노즈 형상이 오자이브, 쌍원뿔, 원뿔 순으로 침투깊이가 증가하였다. 증가되는 정도는 원뿔 형상 침투깊이 대비 쌍원뿔 형상의 경우 약 2%, 오자이브 형상의 경우 약 2.8%로 그 값이 크지 않았다. 노즈 형상 및 길이에 대한 영향을 비교하기 위해 침투깊이 및 노즈 파라미터 비의 경향을 Figure 8과 같이 비교하였다.

Table 3. Comparison of penetration depth by nose shape (Comparative standard : design ①)

Nose shape	Nose length L_n / Penetrator dia D	Penetration depth ratio
Bi-conic Design ③	$L_n/D = 2.38$	1.06
Conic Design ④	$L_n/D = 2.38$	1.08
Ogive Design ⑤	$L_n/D = 2.38$	1.05

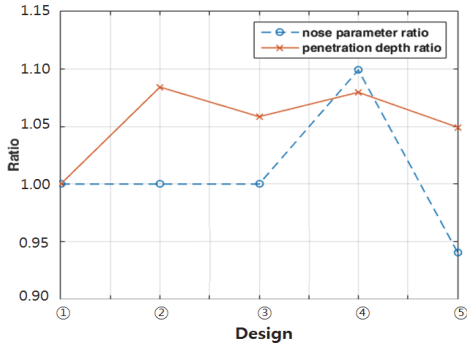


Fig. 8. Tendency of penetration depth and nose parameter

설계안 ①~⑤의 침투깊이와 노즈 파라미터의 경향 비교를 통해, 노즈 파라미터값을 추정한 설계안 ③을 제외하고, 설계안 ①, ②에서 침투 실험식 기반 동일한 노즈 파라미터일 때는 노즈 길이가 더 클 경우에 침투 깊이가 큰 것을 확인할 수 있다. 또한, 설계안 ④, ⑤에서 노즈 길이가 동일한 경우에는 노즈 형상에 따른 노즈 파라미터 값이 17% 가까이 차이남에도 침투깊이 차이가 약 2.8%로 차이가 상대적으로 미미함을 확인할 수 있다.

설계안 ②, ⑤에서 노즈 형상이 오자이브로 동일한 경우, 노즈 파라미터 값이 약 6% 증가함에 따라 침투깊이가 약 3% 증가하였다. 노즈 파라미터 값이 약 15% 증가함에 따라 침투깊이가 약 6% 증가한 논문 시험결과(Forrestal et al., 2003)와 그 경향이 유사함을 확인할 수 있으며, 노즈 길이에 따른 노즈 파라미터와 침투깊이 차이 경향이 노즈 형상에 따른 노즈 파라미터와 침투깊이 차이 경향에 비해 상대적으로 작음을 확인할 수 있다.

이를 통해 노즈 형상보다는 노즈 길이가 침투 깊이에 더 큰 영향을 미치며 노즈 길이가 더 클수록 침투/관통 성능이 향상될 것으로 판단된다. 또한, 침투 실험식(Young, 1997)을 이용하여 노즈 파라미터 추정 시 노즈 형상 관련 상수에 대한 보정이 필요하다고 판단된다.

침투탄을 설계할 때, 침투/관통 성능뿐만 아니라 화약 에너지에 의한 위력도 고려해야 한다. 이러한 탄두 위력은, 침투탄의 충전 화약량에 의존하게 되기 때문에 침투/관통 성능이 동일한 탄두일 경우, 충전 화약량이 많을수록 증가하게 된다. 침투자가 동일한 노즈 길이를 가질 경우, 노즈부에 해당하는 중량이 원뿔, 쌍원뿔, 오자이브 순으로 증가하기 때문에, 충전 화약량 측면에서 원뿔 형상으로 설계하는 것이 상대적으로 유리하다고 판단된다.

3.2 노즈 팁의 직경 영향

식 (2)를 통해 노즈 팁의 직경이 증가되면 될수록 노즈 파라미터 값이 증가됨을 확인할 수 있다. 노즈 팁 직경에 의한 영향을 확인하기 위해, 동일 노즈 형상과 길이에서 노즈 팁 직경을 침투자 직경의 0 ~ 0.6배로 변화시킨(이하 0.0D ~ 0.6D) 침투자 7종을 설계하였으며, 설계한 침투자의 노즈 팁 형상은 Figure 9와 같다. 침투자의 중량은 동일하고 침투자 직경 대비 노즈 길이는 $L_n/D = 2.38$ 이다. 전산해석 결과는 Table 4와 Figure 10과 같다.

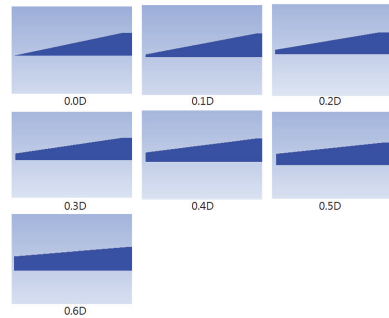


Fig. 9. Nose shape by nose tip diameter

Table 4. Comparison of penetration depth ($L_n/D = 2.38$) (Comparative standard : nose tip diameter 0.0D)

Nose tip diameter	Nose parameter ratio	Penetration depth ratio
0.0D	1.00	1.00
0.1D	1.03	1.07
0.2D	1.06	1.08
0.3D	1.11	1.12
0.4D	1.17	1.12
0.5D	1.26	1.08
0.6D	1.39	0.99

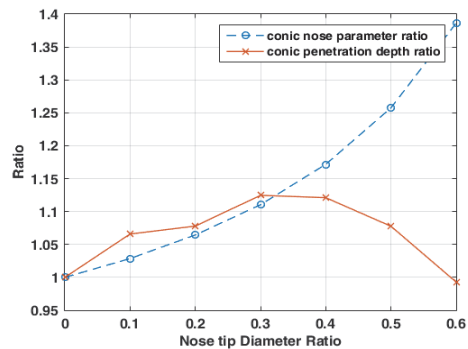


Fig. 10. Tendency of penetration depth and nose parameter by nose tip diameter. ($L_n/D = 2.38$)

노즈 팁 직경이 0.0D ~ 0.3D 까지는 침투 깊이가 증가하는 경향을 보이다 이후 값에서는 침투 깊이가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 침투 깊이가 증가하는 경향은 침투 실험식으로 도출된 노즈 파라미터 경향과 유사함을 확인할 수 있다.

이러한 결과로 노즈 팁 직경의 증가와 노즈 파라미터 증가 경향이 유사한 구간 상한선이 있다는 것을 확인하였으며, 설계된 침투자의 탄체 직경 대비 노즈 길이 값 $L_n/D = 2.38$ 에서는 노즈 팁 부 직경이 0.3D 일 때 까지 침투 실험식 기반의 노즈 파라미터 증가 경향과 침투깊이 증가 경향이 유사함을 확인할 수 있었다.

다른 탄체 직경 대비 노즈 길이 값의 경우, 노즈 팁 직경에 의한 침투깊이 및 노즈 파라미터 경향을 비교하기 위해, 원뿔 형상에 대해 신뢰도 검증에 사용한 모델의 탄체 직경 대비 노즈 길이 값 $L_n/D = 1.66$ 을 가지고 노즈 팁 직경이 0.0D ~ 0.6D인 침투자 7종을 설계하였다. 전산해석 결과는 Table 5와 Figure 11과 같다.

Table 5. Comparison of penetration depth ($L_n/D = 1.66$) (Comparative standard : nose tip diameter 0.0D)

Nose tip diameter	Nose parameter ratio	Penetration depth ratio
0.0D	1.00	1.00
0.1D	1.02	1.01
0.2D	1.05	1.04
0.3D	1.09	1.13
0.4D	1.14	1.11
0.5D	1.21	1.08
0.6D	1.32	0.97

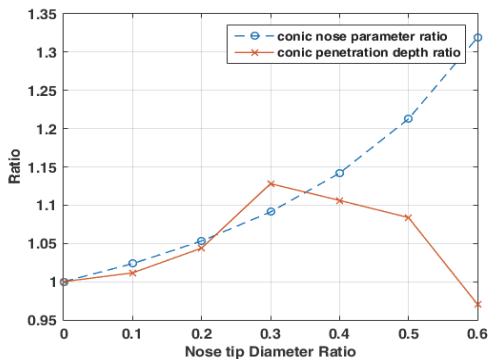


Fig. 11. Tendency of penetration depth and nose parameter by nose tip diameter. ($L_n/D = 1.66$)

전산해석 결과를 통해, 노즈 팁 직경이 0.3D까지 노즈 파라미터 증가 경향과 유사한 경향으로 침투깊이가 증가하다가 그 이후에는 감소됨을 확인할 수 있으며, 이러한 경향은 탄체 직경 대비 노즈 길이 값이 $L_n/D = 2.38$ 일 때의 결과 값과 유사함을 확인할 수 있다.

반경험적 모델(Forrestal et al., 1994) 및 공동 확장(Cavity expansion) 모델(Forrestal and Tzou, 1997) 기반의 분석 모델로 침투자의 최적 노즈 형상을 찾는 기존 연구(Ben-Dor et al., 2009)에서, 원뿔 노즈 형상의 경우 노즈 팁 직경이 존재하는 것이 침투깊이 향상에 유리하다고 기술하였으며, 이는 특정 노즈 팁 직경에서 침투깊이 최대값을 갖는 전산해석 결과와 유사함을 확인할 수 있었다.

이를 통해, 노즈 길이가 한정되어 있는 경우, 노즈 팁 부 직경을 특정값까지 증가시켜 침투깊이를 향상시킬 수 있다고 판단된다. 노즈 팁 직경이 증가됨에 따라서 노즈 부에 해당하는 중량이 증가하기 때문에 침투/관통 성능 뿐만 아니라 탄두 위력에 영향을 미치는 충전 화약량을 고려하여 노즈 부를 설계하여야 한다.

4. 결론

본 연구에서 노즈 형상 인자들이 침투자의 콘크리트 침투/관통성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 유한요소 해석 프로그램 AUTODYN을 사용하여 전산해석을 수행하였다. 노즈 형상, 노즈 길이 그리고 노즈 팁 직경에 따라 설계된 침투자에 대해 콘크리트 침투/관통성능을 분석하였으며 정리하면 다음과 같다.

첫째로, 논문 시험결과의 침투깊이와 가속도 이력을 전산 해석결과와 비교하여 전산해석의 신뢰도를 검증하였다.

둘째로, 노즈 형상과 노즈 길이에 따른 침투자의 침투/관통 성능을 비교하였다. 전산해석을 통해, 침투자의 노즈 형상보다는 노즈 길이가 침투/관통 성능에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 노즈 길이가 더 클수록 침투/관통 성능이 향상됨을 확인하였다. 침투 실험식을 이용하여 노즈 파라미터 추정 시 노즈 형상 관련 상수에 대한 보정이 필요하다고 판단된다.

셋째로, 노즈 팁 직경에 따른 침투자의 침투/관통 성능을 비교하였다. 특정 노즈 팁 직경까지는 침투 실험식으로 도출한 노즈 파라미터 증가 경향과 유사한 경향으로 침투깊이가 증가하다가 감소됨을 확인하였으며, 노즈 길이가 한정되어 있는 경우, 노즈 팁 직경을 특정값까지 증가시켜 침투성능을 향상시킬 수 있다고 판단된다.

침투탄 설계 시 침투/관통성능 뿐만 아니라 충전 화약
 량에 의존하는 탄두 위력도 고려해야 한다. 탄두 위력 측
 면에서 노즈부 중량이 상대적으로 작은 형상이 유리하기
 때문에, 침투탄 설계 시 침투/관통성능 향상을 위한 노즈
 형상 인자 뿐만 아니라 그에 따른 노즈부 중량까지 고려
 하여야 한다고 판단된다.

References

C.W.Young(1997), Penetration Equations, SAND97-2426,
 Sandia National Laboratories.
 X.W. Chen, Q.M. Li(2002), “Deep penetration of a
 non-deformable projectile with different geometrical
 characteristics”, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 27, pp.
 619-637.
 T. Borvik, M. Langseth, O.S. Hopperstad, K.A. Malo
 (2002), “Perforation of 12mm thick steel plates by
 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical
 and conical noses Part I: Experimental study”, *Int.
 J. Impact Eng.*, Vol. 27, pp. 19-35.
 T. Borvik, O.S. Hopperstad, T. Berstad, M. Langseth
 (2002), “Perforation of 12mm thick steel plates by
 20mm diameter projectiles with flat, hemispherical
 and conical noses Part II: numerical simulations”,
Int. J. Impact Eng., Vol. 27, pp. 37-64.
 N.K. Gupta, M.A. Iqbal, G.S. Sekhon(2007), “Effect of
 projectile nose shape, impact velocity and target
 thickness on deformation behavior of aluminum
 plates”, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 44, pp.
 3411-3439
 K.M. Kpenyigba, T. Jankowiak, A. Rusinek, R. Pesci,
 B. Wang(2015), “Effect of projectile nose shape on
 ballistic resistance of interstitial-free steel sheets”,
Int. J. Impact Eng., Vol. 79, pp. 83-94.
 AUTODYN, Theory Manual, Revision 4.0, Century
 Dynamics Inc., 1998.
 M.J. Forrestal, D.J. Frew, J.P. Hickerson, T.A. Rohwer
 (2003), “Penetration of concrete targets with
 deceleration-time measurements”, *Int. J. Impact
 Eng.*, Vol. 28, pp. 479-497.
 Kim S.B., Yoo Y.H.(2015), “Concrete Target Size
 Effect on Projectile Penetration”, *Journal of the
 Korea Institute of Military Science and Technology*,

Vol. 18, 154-159.
 (김석봉, 유요한 (2015) “침투시험에서의 콘크리트
 표적크기 영향 분석”, 군사과학기술학회, Vol.18,
 154-159.)
 LS-Dyna, Theory manual, Livermore Software Technology
 Corporation. 2006.
 Herrmann, W(1969). “Constitutive Equation for the
 Dynamic Compaction of Ductile Porous Materials”,
J. Appl. Phys., 40, 6, pp. 2490-2499.
 Riedel, W., Thoma. K. and Hiermaier, S(1999),
 “Numerical Analysis Using a New Macroscopic
 Concrete Model for Hydrocodes”, *Proc. 9th Int.
 Symposium on Interaction of effects of Munitions
 with Structures*, pp. 315-322.
 Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K(2008), “Numerical
 Assessment for Impact Strength Measurements in
 Concrete Materials”, *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 36
 (2), pp. 283.
 Beppu M., Miwa K., Itohb M., Katayame M. and Ohno
 T(2008), “Damage evaluation of concrete plates by
 high-velocity impact.” *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 35,
 pp. 1419-1426
 Hao Y., Hao H. and Li Z-X(2010), “Confinement effects
 on impact test of concrete compressive material
 properties.” *International Journal of Protective
 Structures*, 1(1), pp. 145-167
 Nyström U. and Gylltoft K(2011), “Comparative numerical
 studies of projectile impacts on plain and steel-fibre
 reinforced concrete.”, *Int. J. Impact Eng.* Vol. 38,
 pp. 95-105.
 M.J. Forrestal, B.S. Altman, J.D. Cargile, S.J. Hanchak
 (1994), “An empirical equation for penetration depth
 of ogive-nose projectiles into concrete targets”, *Int.
 J. Impact Eng.*, Vol. 15, pp. 395-405.
 M.J. Forrestal, D.Y. Tzou(1997), “A spherical cavity-
 expansion penetration model for concrete targets”,
Int. J. Solids Struct., Vol. 34, pp. 4127-4146.
 G. Ben-Dor, A. Dubinsky, T. Elperin(2009), “High-
 Speed Penetration Modeling and Shape Optimization
 of the Projectile Penetrating into Concrete Shields”,
Mechanics Based Design of Structures and Machines,
 Vol. 37, pp.538-549.



주 용 원 (jyongw@naver.com)

2010 KAIST 기계공학 학사

2012 KAIST 기계공학 석사

2013~ 현재 국방과학연구소 제4기술연구본부 연구원

관심분야 : 침투, 폭발, 구조, 전산수치해석