

침투시험에서의 콘크리트 표적크기 영향 분석

김석봉^{*,1)} · 유요한¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Concrete Target Size Effect on Projectile Penetration

Seokbong Kim^{*,1)} · Yohan Yoo¹⁾

¹⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 15 August 2014 / Revised 3 February 2015 / Accepted 20 March 2015)

ABSTRACT

This paper deals with the effect of concrete target size on penetration of projectiles. We investigated the penetration depth and residual velocity of projectiles using the 2-D axial symmetric model. Most analysis were conducted with 13 kg projectile (striking velocity: 456.4 m/s) and concrete target with compressive strength of 39 MPa. This paper provided penetration depth (or residual velocity) versus ratio D/d (target diameter, D and projectile diameter, d). When the bottom of concrete cylinder was constrained, penetration depth converged to limit depth more than the ratio D/d of 36. The residual velocity of projectile with thin concrete target were investigated. The residual velocity was converged to specific velocity more than the ratio D/d of 16.

Key Words : Impact(충돌), Penetration Depth(침투깊이), Concrete Target(콘크리트 표적), Projectile(발사체), Residual Velocity(잔류속도)

1. 서론

탄두의 콘크리트 표적 침투 시험 시 일반적으로 탄두의 생존성, 감가속도, 탄두 침투깊이 또는 관통 후 잔류속도를 평가한다¹⁻⁵⁾. 이때 콘크리트 표적크기 또는 경계조건에 따라서 관통성능에 차이를 보이며 콘크리트 파단형상 또한 다르게 나타난다. 콘크리트 표적이 어느 임계 크기 이상이 되어야 무한 표적과 동

일해지며 이 경우 콘크리트 크기 영향에 관계없이 침투성능은 유사하게 나타난다^{6,7)}. 콘크리트 표적 크기를 결정함에 있어 탄두대비 표적 크기 영향을 살펴본다면 관통시험의 신뢰도를 확보할 수 있다. 표적을 충분히 크게 제작한다면 신뢰도는 확보할 수 있으나 과도한 제작비용이 발생하는 문제가 있다. 결국 신뢰도와 비용을 고려한 표적의 효율적인 형상결정 연구가 필요하다. 다양한 관통, 표적조건이 존재하지만 본 연구에서는 무근 콘크리트 표적에 대하여 크기 변화에 따른 탄두의 침투성능을 평가하였다. 이를 통하여 시험의 신뢰도가 확보되는 최소 표적크기를 제안하였다.

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

콘크리트 표적 크기를 다르게 하여 탄두의 침투성능 차이를 비교하였다. 탄두가 콘크리트 표적을 관통하지 못하고 정지할 경우에 대하여 경계조건 및 콘크리트 표적 크기에 대한 침투깊이를 분석하였다. 콘크리트 표적직경(D)에 대한 탄두직경(d)의 비인 D/d를 6에서부터 36배까지 다양하게 설정하였다. 또한 탄두가 표적을 관통하여 잔류속도가 있을 경우에 대하여 D/d에 대한 잔류속도도 평가하였다. 이를 위하여 먼저 해석의 신뢰도 확보를 위하여 침투시험결과를 이용하였으며 이후 다양한 해석을 수행하였다^{5,6)}.

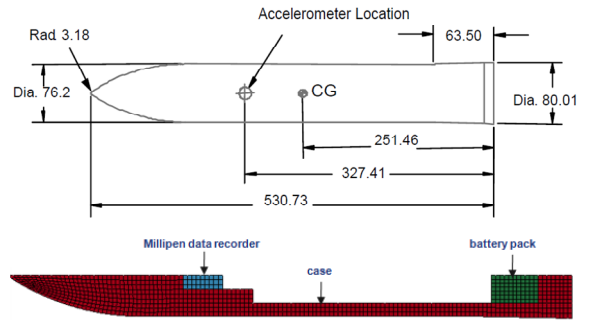


Fig. 1. Geometry for projectile, dimension in mm

2. 해석 신뢰도 검증

탄두 침투 시 콘크리트 표적 크기의 영향을 해석을 통하여 살펴보기 위하여 먼저 침투해석의 신뢰도를 검증하여야 한다. 본 연구에서는 Forrestral 등(2003)의 논문 시험결과를 검증에 사용하였다⁴⁾. 이후 표적의 형상을 변화하며 표적 크기의 영향을 살펴보았다.

2.1 콘크리트 침투시험 결과

인용 논문에서 수행한 시험결과를 이용하여 해석의 신뢰도를 검증하였다. 인용된 논문에서 사용된 탄의 형상은 Fig. 1과 같으며 무게는 13 kg로 내부에 배터리 팩 및 가속도 측정장치가 부착되어 있다. 해석에 사용하기 위하여 시험결과 중 하나를 선택하였다. 콘크리트 침투 시험 시 탄두속도는 456.4 m/s로 39 MPa(5700 psi) 강도의 실린더형 콘크리트(직경, 높이 1830 mm)에 충돌하였다. 이때 콘크리트 외부는 두꺼운 강판으로 둘러싸여 있어 반경방향으로의 콘크리트 변형을 구속하였다. 시험결과 탄두의 침투깊이는 940 mm 이다. 이때 가속도계에서 얻어진 가속도-시간 이력은 Fig. 2의 실선과 같으며 전체 침투시간은 약 4.5 msec 이다. Forrestral 등은 콘크리트 침투 모델을 제안하여 점선과 같은 사각파 형태로 가속도-시간 곡선을 예측한바 있다.

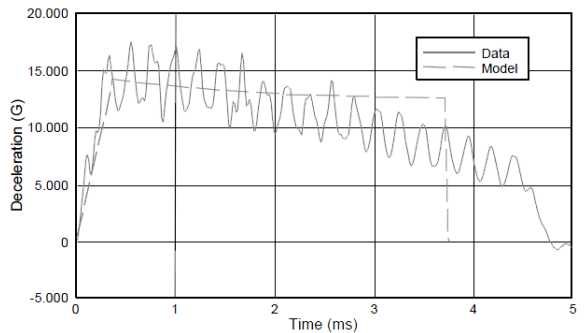


Fig. 2. Deceleration versus time data and penetration model prediction(Forrestral *et al.*, 2003)

2.2 해석을 통한 신뢰도 검증

해석은 2D 축대칭으로 LS-DYNA3D v.971을 사용하였다. 요소의 크기는 탄두 4 mm, 콘크리트 2 mm로 2:1의 비율이며 콘크리트의 둘레 및 하단부 경계조건 및 해석결과는 Fig. 3과 같다. 시험과 동일하게 콘크리트 둘레는 반경방향을 구속하였으며 하단부는 전체 구속을 하였다. 각 부분의 재료 물성은 Table 1과 같

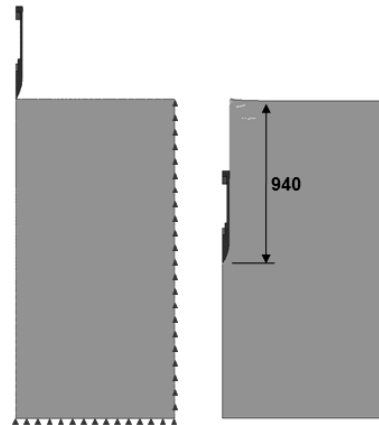


Fig. 3. Boundary condition and analysis result

다⁴⁾. 탄두는 Mat_plastic_kinematic 모델을 적용하였으며, 콘크리트는 Mat_soil_foam 모델과 함께 보유하고 있는 39 MPa 강도 콘크리트의 압력-변형률 선도를 적용하였다. 탄두의 경우 대변형이 없으므로 변형률속도를 고려하지 않았으며 사용된 콘크리트 모델은 별도

Table 1. Material parameters for projectile

Material	Density [kg/m ³]	E [GPa]	Yield stress [MPa]	Hardening Modulus [MPa]
Case (4340 steel)	7.82×10 ³	207	1240	1660
Millipen (plastic)	2.05×10 ³	6.89	34.5	0.00689
Battery pack (Al)	2.67×10 ³	68.9	483	689
Concrete	2.25×10 ³	Unconfined compression stress : 39 MPa		

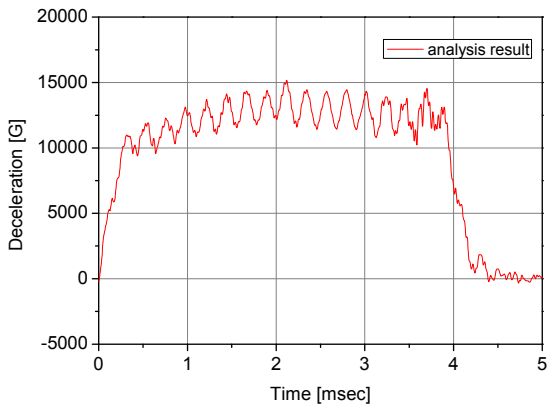


Fig. 4. Deceleration versus time data of simulation

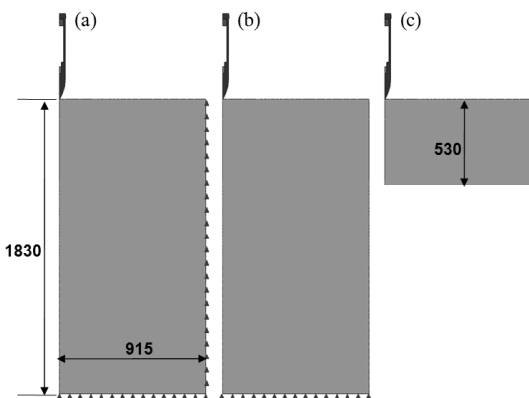


Fig. 5. Boundary conditions of analysis(D/d = 24); (a) circumference(radial-dir. constraint) and bottom side constraint (BC1), (b) bottom side constraint (BC2), (c) thin concrete target penetration (BC3)

의 EOS가 필요 없는 모델이므로 EOS는 고려하지 않았다. 해석 시 콘크리트 eroding 값을 조절하여 침투깊이가 시험값인 940 mm와 동일하게 하였다. LS-DYNA에서 제공하는 Mat_add_erosion 모델을 사용하였으며 eroding 값의 범위를 0.2~0.5로 조절하여 최종적으로 0.3의 값을 사용하였다. 이때 탄두의 가속도 이력은 Fig. 4와 같으며 시험 값과 유사한 경향을 보인다고 판단하였다. 침투깊이 및 가속도 이력을 통하여 해석의 신뢰도를 검증하였으며 이를 이용하여 콘크리트 직경을 변화시켜 가며 침투깊이를 분석하였다.

3. 콘크리트 표적 크기 영향

탄두가 456.4 m/s로 표적에 침투할 경우 표적 직경에 따른 침투깊이 또는 잔류속도를 분석하였다. 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 3가지의 경계조건을 고려하였다. 첫째, 콘크리트 둘레 및 하단부를 고정한 경우와 둘째, 하단부만 고정한 경우에 대하여 직경에 따른 침투깊이 수렴정도를 비교하여 반경방향 구속에 따른 침투깊이의 차이를 평가하였다. 셋째는 콘크리트 두께를 탄 길이와 동일하게 530 mm로 설정한 후 직경에 따른 탄두 잔류속도를 분석하였다. 해석에 적용된 D/d(D: 콘크리트표적 직경, d: 탄두직경) 범위는 6-36 이다.

3.1 콘크리트 표적 둘레 및 하단부 고정(BC1)

해석결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 사용한 경계조건(Fig. 3)과 동일한 경계조건이다. D/d를 변화시키며 침투깊이를 살펴보았으며 침투형상은 Fig. 6(a)와 같으며 D/d에 따른 침투깊이는 Fig. 7과 같다. 표적 둘레를 고정된 경우에는 표적직경이 탄두직경의 6배(D/d: 6)까지 작아져도 침투깊이는 유사하며 시험결과와 동일하게 약 940 mm 분포를 보인다.

Frew 등(2006)은 콘크리트 강도가 23 MPa이며 탄속이 약 330 m/s인 경우에 대하여 본 연구와 동일형상의 탄두 및 콘크리트로 시험을 수행한 바 있다⁶⁾. D/d가 12, 18, 24에 대하여 시험하였으며 이 경우 침투깊이는 거의 동일하며 D/d가 작을수록 콘크리트 충돌면의 파손 정도가 크게 나타난다고 기술하였다. 결국 콘크리트 표적 둘레를 구속하여 시험할 경우, 탄두의 침투깊이는 표적의 크기에 둔감해지게 되며 이를 고려하여 표적크기를 작게 제작한다면 시험 비용을 크게 절감할 수 있을 것으로 보인다.

3.2 콘크리트 표적 하단부 고정(BC2)

경계조건으로 콘크리트의 둘레를 고정하지 않고 하단부만 구속하였다. 측면이 고정되어 있지 않으므로 탄두 침투로 인하여 콘크리트가 받는 압력이 측면을 고정한 경우에 비하여 상대적으로 작으며 이 때문에 Fig. 6(b)와 같이 표적 직경이 작아질수록 침투깊이가 커지게 된다.

Fig. 7과 같이 콘크리트 직경이 커질수록 침투깊이가 점점 더 감소하며 D/d가 36에 이르러서야 측면을 구속한 경계조건과 동일한 940 mm 침투깊이를 보인다. 탄두는 표적을 관통할 때 형상변형이 거의 없이 질량을 유지한다. 탄두의 부피만큼 콘크리트 표적 둘레에 가해지는 압력차이가 크며 이 때문에 침투깊이 차이가 발생한다.

D/d가 8, 16, 24, 36에서 각 경계조건에서 동일 침투 깊이(약 770 mm)에서의 콘크리트 압력을 비교하였다. Fig. 8(a)와 같이 측면이 구속된 경우(BC1)에 D/d의 변화에 따른 콘크리트 압력 분포가 거의 유사하다. 이에 반해 측면 구속이 없을 경우(BC2)에 반경이 커질수록 압력이 점차 커지며 분포영역 또한 넓어지는 것을 알 수 있다. 탄두의 침투에서 반경방향으로 100 mm 지점(탄두 반지름의 약 2.6배)에서의 압력이 BC1에서는 D/d: 8, 16, 24, 36에 대하여 각각 49.8, 49.2, 50.1, 48.1 MPa로 대체로 유사하며, BC2에서는 각각 14.1, 26.6, 30.1, 47.9 MPa로 압력이 증가함을 알 수 있다. 동일한 D/d에서 두 경계조건을 비교해보면 압력분포 차이가 명확하며 D/d = 36로 표적이 충분히 크면 경계조건 영향이 작아져 압력분포 및 침투깊이가 두 경계조건(BC1, BC2)에서 유사하게 나타난다.

3.3 콘크리트 관통 후 잔류속도 분석(BC3)

동일한 탄두 초기속도(456.4 m/s)에 대하여 콘크리트 표적의 두께(h)를 탄두길이(530 mm)와 동일하게 하여 관통 후 잔류속도를 비교하였다(h: 탄두길이와 동일, h/d = 7.0). 이 경우 콘크리트 측면 및 하단부에 구속조건이 없는 자유상태이다. 관통형상은 Fig. 6(c)와 같으며 Fig. 9에서 D/d가 16 이상이 되면 잔류속도가 358 m/s로 수렴하는 것을 알 수 있다. 관통 시 속도는 표적 직경이 작을 경우 표적의 지지력이 약해지게 되며 이 때문에 잔류속도가 크게 나타난다. 콘크리트 직경이 일정크기 이상이 되면 측면의 지지력이 커져서 잔류속도가 일정 속도에 수렴하는 것으로 보인다. D/d가 16 이상에서 수렴된 관통 후 탄두의 속도

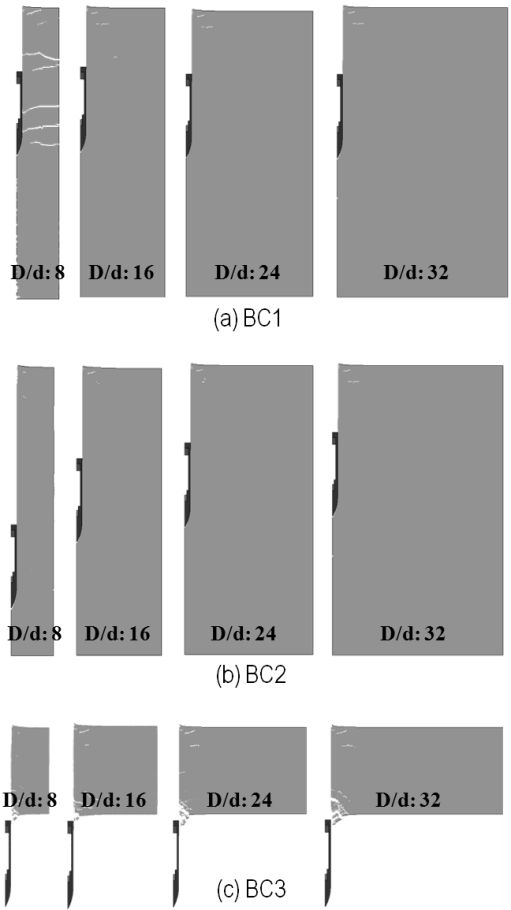


Fig. 6. Final concrete penetration shape; (a) BC1, (b) BC2, (c) BC3

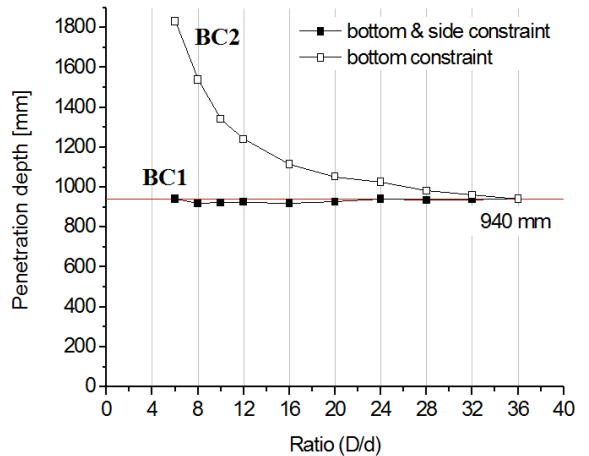
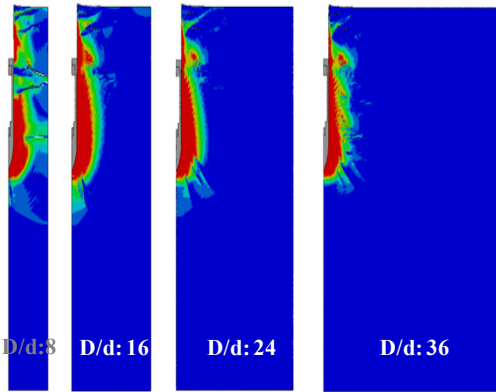
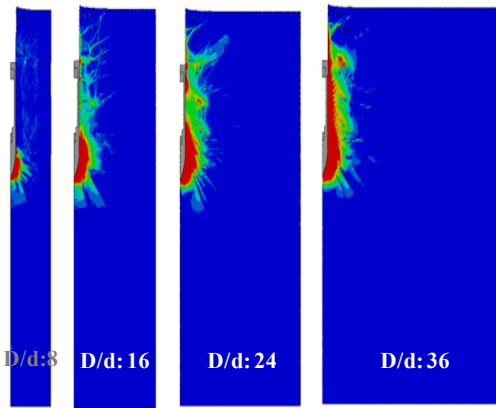


Fig. 7. Penetration depth with the variation of D/d



(a) BC1



(b) BC2

Fig. 8. Pressure distribution of concrete at the penetration depth of 770 mm: (a) BC1, (b) BC2

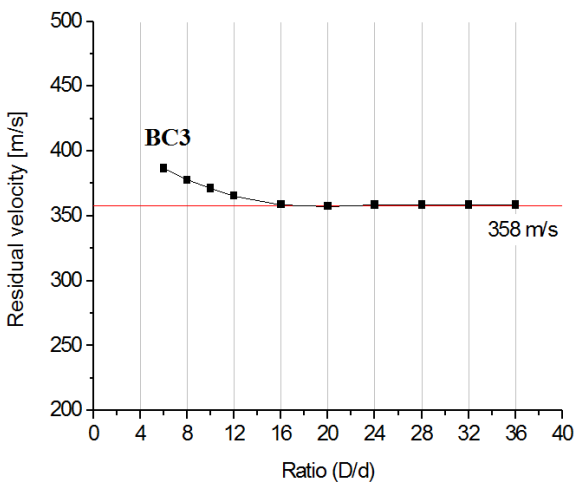


Fig. 9. Residual velocity with the variation of D/d

및 운동에너지는 각각 21.56 %, 38.5 % 감소하였다. 본 연구에서는 표적의 두께를 하나의 경우에 대해서만 고려하여 잔류속도를 분석하였지만 콘크리트의 두께를 점차 줄일수록 잔류속도에 수렴하는 D/d의 값이 16보다 점차 작아질 것이라 예측할 수 있다. 이에 대한 논의는 향후 초기속도 및 콘크리트 두께를 변수로 하여 에너지 감소 정도에 따른 관통성을 평가할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 표적 크기를 다르게 하여 탄두의 침투성능 차이를 비교하였다. 3가지의 경계조건에 대하여 6~36의 D/d(D: 콘크리트표적 직경, d: 탄두직경) 범위에서 침투깊이 및 잔류속도를 평가하였으며 정리하면 다음과 같다.

1. 침투깊이 및 가속도이력 시험결과와 해석결과를 비교하여 해석의 신뢰도를 확보하였다.
2. 콘크리트 표적 둘레 및 하단부를 고정할 경우 표적 직경이 탄두직경의 6배로 작아져도 최종 침투깊이는 변화 없이 시험결과와 동일하게 약 940 mm이다.
3. 콘크리트 표적 하단부만 고정할 경우(BC2) 측면까지 고정할 경우(BC1)에 비하여 침투 시 콘크리트가 받는 압력이 상대적으로 작으므로 표적직경이 커질수록 침투깊이가 작아진다. D/d가 36에 이르면 침투깊이가 940 mm로 수렴한다.
4. 콘크리트 표적의 두께를 탄두 길이와 동일하게 하여 잔류속도를 비교한 경우 D/d가 16 이상이 되면 잔류속도가 358 m/s로 수렴하는 것을 알 수 있다.
5. 탄두 속도 범위에 대한 경계조건별 표적의 임계크기를 데이터베이스화 한다면 표적 제작비용을 최소화함과 동시에 표적크기에 독립적인 탄두 관통성을 얻을 수 있을 것이다.

References

[1] D. J. Frew, S. J. Hanchak, M. L. Green and M. J. Forrestal, "Penetration of Concrete Targets with Ogive-nose Steel Rods," Int. J. Impact Eng., Vol. 21, pp. 489-497, 1998.

- [2] D. J. Frew, M. J. Forrestal and S. J. Hanchak, "Penetration Experiments with Limestone Targets and Ogive-nose Steel Projectiles," ASME J. Appl. Mech., Vol. 67, pp. 841-845, 2000.
- [3] M. J. Forrestal and S. J. Hanchak, "Penetration Limit Velocity for Ogive-nose Projectiles and Limestone Targets," ASME J. Appl. Mech., Vol. 69, pp. 853-854, 2000.
- [4] 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.
- [5] T. L. Warren, A. F. Fossum and D. J. Frew, "Penetration into Low-strength(23 MPa) Concrete: Target Characterization and Simulations," Int. J. Impact Eng., Vol. 30, pp. 477-503, 2004.
- [6] 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.
- [7] S. B. Kim, Y. H. Yoo and H. J. Kim, "Numerical Study of Concrete Target Size Effect on Projectile Penetration," The 4th Int. Conf. on Design and Analysis of Protective Structures, P-T6-2, 2012.