

소형 관통자의 콘크리트 표적 수직충돌 침투특성 연구

A Study on Normal Penetration Characteristics of Small Projectiles in Concrete Targets

김 용 석* 여 환 곤*
Yong-Seok Kim Hwan-Gon Yeo

Abstract

After investigating the analytic model to predict penetration depth, we propose an analytical model which can be used in estimating the normal penetration characteristics of small projectiles, when they are impacted to the concrete targets with ordnance velocities. The major parameters of this model are nose factor of penetrator, compressive strength and density of targets, and impact velocity. We can predict accelerations, velocities, displacements of projectiles and applied forces by this proposed model. Estimated penetration depths were shown 5% error. We also verified the usefulness of the new method with laboratory impact test data.

Keywords : Small Projectile(소형 탄자), Normal Impact(수직 충돌), Concrete Target(콘크리트 표적), Impact Test(충돌 시험), Penetration Depth(침투 깊이)

1. 서론

콘크리트 표적에 대한 관통자의 침투거동 연구는 약 1940년대 이후부터 시작되었다. 이 분야의 연구는 비균질 콘크리트 재료의 파괴거동 복잡성 때문에 이론 및 수치해석이 어려워서 아직도 실험에 의존한 경험식을 많이 이용하고 있는 실정이다. 대부분의 경험식은 유한 혹은 반무한 표적에 관통자가 충돌할 때 수직침투깊이를 비롯한 관통특성 자료를 통계적 방법으로 수식화하여 만들어졌다. 이런 유형의 대표적인 경험식으로는 NDRC(National Defense Research Committee)식

과^[1], Sliter^[2]이 제안한 침투식이 있다. 경험식은 대체로 간단하고 직관적으로 설계에 적용할 수 있기 때문에 아주 유용하다. 그러나 경험식이 적용되는 충돌속도나 관통자의 크기 등에 있어서 적용 가능한 범위가 제한적이고, 일반화하기가 어려운 단점들로 인하여 복잡한 설계 파라메타의 연구에는 한계가 있다.

Forrestal^[3~5], Young^[6] 등은 경험식을 이용할 때 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 방법을 시도하였다. 즉, 기존의 경험식들이 단순히 특정 설계 파라메타에 국한하여 수식화한 것과는 달리, 하중 모델로부터 관통자의 변위, 속도, 가속도, 저항력 등 운동특성 전반을 해석할 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라 관통(Perforation) 및 경사충돌, 도탄 등과 같은 여러 가지 현상까지 일반화하는데 유리한 장점을 갖고 있다. 또한 저항력 모델을 고려하기 때문에 관통자

† 2011년 1월 10일 접수~2011년 3월 25일 게재승인

* 국방과학연구소 4기술연구본부 탄두신관부(ADD)

책임저자 : 김용석(kys1893@add.re.kr)

가 받는 충돌 환경하에서 탄체에 작용하는 응력을 예측하고, 생존성도 분석이 가능하므로 관통자 연구 분야에서 유용한 도구가 될 수 있다.

본 연구에서는 이런 유형의 하나로 Forrestal이 제안한 콘크리트 표적에 대한 수직충돌 해석 방법을 알아보고, 우리 기관에서 수행한 관통자의 충돌 실험 결과와 해석 모델을 이용하여 관통자의 침투 거동을 고찰하여 이 방법의 유용성을 확인해 보기로 한다.

2. 관통자 운동방정식

Forrestal^[4]은 관통자가 표적에 수직으로 침투할 때 관통자가 받는 저항력을 관통자의 노즈부가 침투하는 크레이트 영역(Crater Region)과 관통자의 긴 원통부가 침투하는 터널 영역(Tunnel Region)으로 나누어서 구분하고, 저항력은 표적의 물성과 시간, 속도의 함수로 정의하여 관통자의 운동방정식을 만들었다. 콘크리트 표적으로부터 받는 총저항력(F)은 표적의 압축강도(f_c)에 의한 저항과 표적매질의 관성저항으로 대별할 수 있다. 이것을 수식으로 표시하면 다음과 같다.

$$F = cz, \quad 0 \leq z \leq 4a \quad (1)$$

$$F = \pi a^2 (Sf_c + N\rho V^2), \quad 4a \leq z \leq P \quad (2)$$

여기서 z , V 는 표적표면에서 수직방향으로의 변위와 속도를 나타내고, c , S 는 결정해야할 실험상수이며, N 은 참고문헌^[7]에 정의된 관통자의 노즈 형상계수, ρ 는 표적의 밀도를 나타낸다. 이 수식은 관통자의 변위가 직경의 약 2배에 도달($z=4a$)할 때까지가 크레이트 영역이고, 그 이후부터 관통자가 정지할 때까지가 터널 영역이다. 크레이트 영역의 저항력은 단순히 변위에만 비례하며, 뉴우튼의 제2법칙으로부터 관통자의 운동방정식을 세워 보면

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = -cz, \quad 0 \leq z \leq 4a \quad (3)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = m V \frac{dV}{dz} = -\pi a^2 (Sf_c + N\rho V^2), \quad 4a \leq z \leq P \quad (4)$$

으로 표현된다. 여기서, 초기조건 $z(t=0) = 0$ 및

$V(t=0) = V_s$ 를 적용하여 변위, 속도, 가속도 해를 구하면 아래와 같다. m 은 관통자의 질량, V_s 는 관통자의 초기 충돌속도를 나타낸다.

$$z = \left(\frac{V_s}{\omega} \right) \sin(\omega t), \quad 0 \leq z \leq 4a \quad (5)$$

$$V = \frac{dz}{dt} = V_s \cos(\omega t), \quad 0 \leq z \leq 4a \quad (6)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} = -\omega V_s \sin(\omega t), \quad 0 \leq z \leq 4a \quad (7)$$

여기서, $\omega = \sqrt{c/m}$ 이며, $t=t_1$ 에서 $V=V_1$ 이고, 변위, 저항력이 같은 연속조건을 적용하면 상수 c 와 속도 V_1 및 t_1 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_1 = \sqrt{\frac{m V_s^2 - 4\pi a^3 S f_c}{m + 4\pi a^3 N \rho}} \quad (8)$$

$$t_1 = \cos^{-1}(V_1/V_s)/\omega \quad (9)$$

$$c = \frac{\pi a}{4} (S f_c + N \rho V_1^2) \quad (10)$$

또한 (4)식을 속도($V_1 \rightarrow 0$)와 변위($4a \rightarrow P$)에 대하여 적분하면 최종 침투깊이 P 는 아래와 같이 계산된다.

$$P = \frac{m}{2\pi a^2 \rho N} \ln \left(1 + \frac{N \rho V_1^2}{S f_c} \right) + 4a, \quad P \geq 4a \quad (11)$$

(11)식에 V_1 값을 (8)식으로부터 대입하고, 실험상수 S 에 대하여 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{N \rho V_s^2}{f_c G} \quad (12)$$

$$G = \left(1 + \frac{4\pi a^3 N \rho}{m} \right) \exp \left(\frac{2\pi a^2 (P - 4a) N \rho}{m} \right) - 1 \quad (13)$$

각각의 충돌시험 자료에서 충돌속도와 침투깊이를 (13)식 및 (12)식에 대입하면 실험상수 S 를 각각 계산하고, 이들의 산술 평균값을 취하여 구할 수 있게 된다.

다. 그리고 터널 영역에서의 관통자 속도 및 가속도, 변위는 (4)식의 적분으로부터 아래와 같이 계산된다.

$$V = (Sf_c/N\rho)^2 \tan(H), \quad 0 \leq z \leq 4a \quad (14)$$

$$\frac{dV}{dt} = -\left(\frac{\pi a^2 S f_c}{m}\right)^2 / \cos^2(H), \quad 4a \leq z \leq P \quad (15)$$

$$z = \frac{m}{\pi a^2 N \rho} \ln\left(\frac{\cos(H)}{\cos(\tan^{-1}(\sqrt{N\rho/Sf_c V_1}))}\right) + 4a, \quad 4a \leq z \leq P \quad (16)$$

$$H = \tan^{-1}(\sqrt{N\rho/Sf_c V_1}) - \frac{\pi a^2}{m} \sqrt{Sf_c N\rho} (t - t_1), \quad 4a \leq z \leq P \quad (17)$$

이와 같이 (1)식 및 (2)식으로 가정된 저항력 모델에 표적의 압축강도 f_c 와 밀도 ρ , 그리고 관통자의 노즈 형상계수 N 만의 함수로부터 크레이트 영역 및 터널 영역의 운동특성과 저항력을 모두 구할 수 있다.

3. 관통자 충돌시험

가. 시험 내용

앞 절에서 구한 운동방정식의 유용성을 확인하기 위하여 소형 관통자 충돌실험을 수행하였다. 이 실험은 기체포를 활용하였으며, 관통자 형상은 Fig. 1과 같고 세부형상 파라메타 값은 Table 1에 나타나 있다. 관통자 중량은 586g, 전장/직경비가 9.9이다. 시험 표적은 강화철근이 없는 콘크리트로 압축강도 35MPa, 밀도는 2.3g/cc이며, 각 표적은 0.25m 두께 단위로 3장 및 4장 적층하여 구성하였다.



Fig. 1. 관통자의 형상

Table 1. 관통자 형상 파라메타 값

Parameter	a	b	c	d
Length(mm)	11.4	169.2	37.6	18.2

나. 시험 결과

충돌실험은 모두 4발 실시하였으며, 표적 충돌속도 및 침투깊이 Table 2에 나타난 것과 같이 충돌속도 510m/s일 때 침투깊이는 0.54m이고, 681m/s일 때는 0.91m로 측정되었다.

Table 2. 충돌실험 결과

Test Number	Impact velocity (m/s)	Target thickness (m)	Penetration depth (m)
1	510	0.75	0.54
2	510	0.75	0.55
3	669	1.00	0.86
4	681	1.00	0.91

4. 관통자 운동 고찰

가. 충돌속도와 침투깊이

먼저 (12)식을 이용하여 실험상수 S 를 구해보자. 이 때 노즈 형상계수는 참고문헌^[7]의 정의에 따라 계산하면 0.27을 얻는다. 이 값과 표적강도, 표적밀도 값으로 S 를 계산하면 8.1, 8.2, 7.8, 7.2이고, 이 들의 평균값을 취하면 7.8이다. (11)식으로부터 충돌속도가 약 300m/s에서부터 900m/s까지의 변화에 따른 침투깊이 계산결과를 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다. 이 곡선으로부터 충돌속도를 알면 반무한 표적에 대한 수직 침투 깊이를 구할 수 있게 된다.

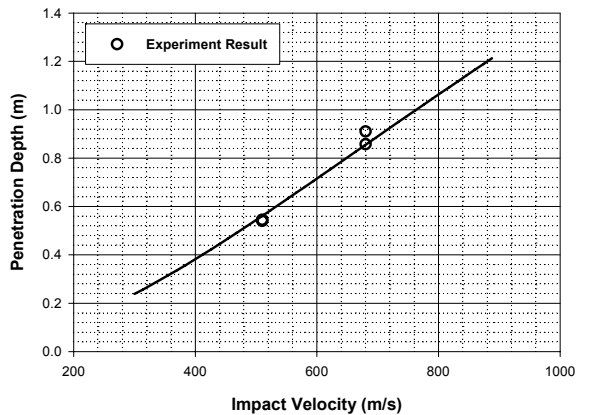


Fig. 2. 충돌속도와 침투깊이 선도

나. 관통자의 운동 분석

앞의 시험번호 2와 4에 대하여 (8), (9)식으로 부터 크레이터 영역에서 터널 영역으로 전환 될 때의 속도, 시간을 구해보면 Table 3과 같다. (5)~(7)식과 (14)~(16)식을 적용하면 관통자가 표적에 충돌하여 정지할 때까지 전 과정에 대한 변위, 속도, 감가속도를 구할 수 있으며, 시간에 따른 변화 곡선이 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5와 같이 나타난다. 관통자가 표적 내부에 완전히 정지할 때까지 소요된 시간은 각각 2.26ms 및 2.82ms 이다.

Table 3. 관통자 운동 분석 결과

Test Number	V_1 (m/s)	t_1 (ms)	a_1 (g)	Max. Load (ton)
2	496	0.090	30,925	18.1
4	668	0.067	38,968	22.8

* : g는 중력가속도를 나타냄

Table 3에서 V_1 는 496m/s 및 668m/s로 충돌 속도보다 약 2~3% 정도 감소된 값을 보이며, t_1 은 0.09ms 및 0.67ms이며, 이 때 최고가속도 a_1 은 약 31,000g에서 39,000g 정도로 예측되고 표적으로부터 관통자가 받는 최고하중은 약 18ton에서 23ton 정도의 크기를 나타낸다. 표적 내부에서의 운동 속도는 Fig. 4와 같이 시간에 따라서 거의 선형적으로 감소한다. 또한 감가속도는 탄자 노즈 부분이 표적에 침투하는 지점에서 Fig. 5와 같이 최고치를 기록하고 탄자가 정지할 때까지 감소하는 특징을 나타낸다.

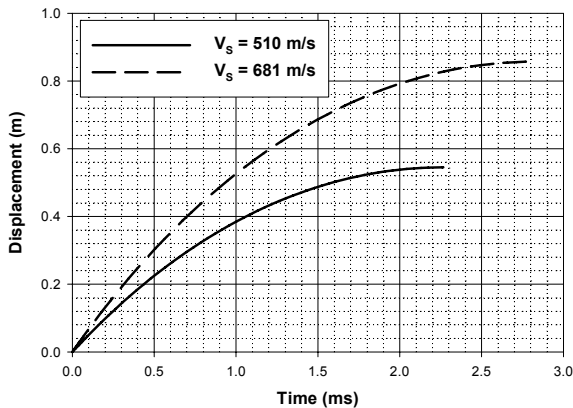


Fig. 3. 시간에 따른 관통자의 변위 선도

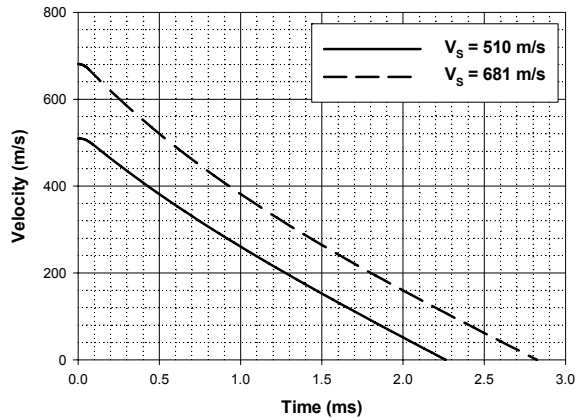


Fig. 4. 시간에 따른 관통자의 속도 선도

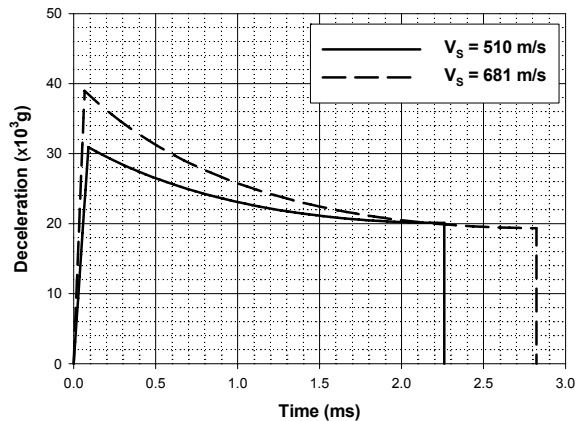


Fig. 5. 시간에 따른 관통자의 감가속도 선도

다. 고찰 및 토의

처음에 가정한 (1)식 및 (2)식의 저항력 모델은 Fig. 6의 가속도 곡선에서 보듯이 관통자의 노즈 부분이 표적에 완전히 침투할 동안에 표적 강도에 의하여 저항력이 급격하게 증가하고 (2)식의 우변 두 번째 항으로 표시된 관성 저항력은 속도가 쇠퇴하면서 소멸되고 나중에는 (2)식의 우변 첫 번째 항인 표적의 압축 강도에 의한 고유의 저항력만이 남아 있음을 나타낸다. 관통자에 탑재되는 구성품의 내충격 성능을 분석하려면 감가속도 값이나 지속시간 등이 주요변수로 고려되기 때문에 $t=t_1$ 에서의 최고 감가속도값은 중요하다. 참고문헌^[4]에서 실시한 중량 905g의 관통자로 압축강도 5,000psi 콘크리트 표적에 400, 600, 800m/s 충돌속도로 시험한 경우에 최고 감가속도는 31,000g, 36,000g, 42,000g로 예상되었다. 이것은 본 연구에서

구한 감가속도 31,000g, 39,000g과 대등한 결과를 얻음으로서 운동방정식의 하중모델이 침투과정에서 관통자의 운동 특징을 잘 표현하는 것을 알 수 있다. Fig. 6에는 2가지 충돌 속도에 대하여 관통자가 침투한 거리와 관통자의 속도 변화를 나타내었다. 여기서 노즈가 침투하는 크레이트 영역에서 속도 감소는 작고, 터널영역에서 점진적인 속도 감소를 잘 나타내 보인다. 총 침투 깊이는 충돌속도 510m/s 일 때 0.55m이고, 681m/s 일 때 0.86m로서 실제 시험결과와 최대 5%의 오차를 보인다. 이 오차에 영향을 미치는 주요 인자는 (12)식에서 노즈 형상계수 N 이 있는데 본 실험에 사용된 소형 탄자는 주로 충돌실험에 사용되는 오자이브 형태와는 달리 스텝콘 형태이다. 노즈 형상계수에 대한 민감도 분석뿐 아니라 콘크리트 표적의 강도를 대표하는 S 수와 침투깊이 관계의 영향을 파악하기 위하여 많은 실험 자료의 확보가 필요해 보인다.

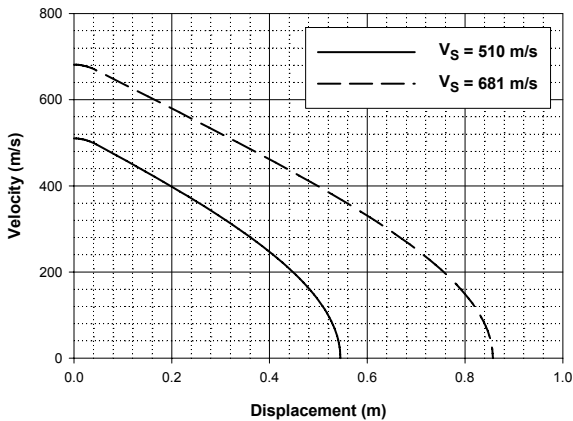


Fig. 6. 거리에 따른 관통자의 속도 선도

5. 결론

본 논문에서는 충돌실험 자료로부터 적당한 하중모델을 도입하여 콘크리트 표적에 수직으로 충돌하는 경우의 침투깊이를 충돌속도 및 표적의 압축강도와 밀도의 함수로 나타내었다. 제안된 방법을 적용하면 관통자의 가속도, 속도, 변위를 시간에 따라 모두 구하여 운동 특성을 분석할 수 있으므로, 침투감가속도 및 저항력의 크기를 구할 수 있어 앞으로 관통자의

생존성 예측과 같은 주요 설계 파라메타의 분석에 유용할 것으로 사료되지만 침투 깊이가 예측에 영향을 주는 노즈 형상계수 N 과 콘크리트 표적의 강도를 대표하는 S 수와 침투깊이 관계도 더 연구할 필요성이 있어 보인다. 또한 본 연구를 토대로 유한표적에 대한 관통(Perforation)해석 및 경사충돌 문제에 연구범위의 확장이 가능할 것으로 예상되어 침투 관통 연구 분야에 중요한 도구가 될 수 있을 것으로 사료된다.

Reference

- [1] R. P. Kennedy, "A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects", *Nulc. Eng. Des.*, Vol. 37, pp. 183~203, 1976.
- [2] G. E. Sliter, "Assessment of Empirical Concrete Impact Formulas", *ASCE J. Struct. Div.*, Vol. 106, pp. 1023~1045, 1980.
- [3] M. J. Forrestal, B. S. Altman, J. D. Cargile, and S. J. Hanchak, "An Empirical Equation for Penetration Depth of Ogive-nose Projectiles into Concrete Targets", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 15, pp. 395~405, 1994.
- [4] M. J. Forrestal, D. J. Frew, S. J. Hanchak, and N. S. Brar, "Penetration of Grout and Concrete Targets with Ogive-nose Steel Projectiles", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 18, pp. 465~476, 1996.
- [5] 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.
- [6] C. W. Young, "Penetration Equations", SAND97-2426, 1997.
- [7] S. E. Jones, W. K. Rule, D. M. Jerome, and R. T. Klug, "On the Optimal Nose Geometry for a Rigid Penetrator", *Comput. Mech.*, Vol. 22, pp. 413~427, 1998.
- [8] M. J. Forrestal, D. J. Frew, H. P. Hickerson, and T. A. Rohwer, "Penetration of Concrete Targets with Deceleration-time Measurements", *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 28, pp. 479~497, 2003.