

철근콘크리트 벽체의 충격거동 및 충격해석연구

Impact Behavior and Impact Analysis of Reinforced Concrete Walls

오 병 환*
Oh, Byung Hwan

요 약

원자력발전소의 콘크리트 격납용기구조물등과 같이 안전성이 높게 요구되는 구조물들은 예기치 않은 혹은 부주의한 사고로 인하여 발생하는 비산물체에 의한 충격에 충분히 저항할 수 있도록 설계되어야 한다. 이러한 물체에 의한 충격은 벽면의 국부적인 피해와 벽 전체의 전반응답으로 나타나며, 이에 저항하기 위해서는 벽체의 관통이나 스캐빙(scabbing)이 일어나지 않도록 벽두께를 결정하여야 하고 또한, 파괴가 일어나지 않도록 벽체를 설계하여야 한다. 본 논문에서는 지금까지 연구된 충격현상에 대한 이론 및 실험결과를 토대로 하여 벽면의 국부효과 발생시 이와 동시에 진행되는 탄성효과 및 전반거동효과를 고려하여 관입깊이를 계산할 수 있는 이론을 유도하였으며, 기존의 실험결과를 이용하여 이론적인 결점을 보완한 반이론식을 제안하였다. 또한, 본 논문에서는 실험결과와 기존식 및 본 논문에서 연구된 제안식에 의한 해석결과를 수치적으로 비교하였으며, 관통두께에 대한 계산식과 더불어 탄성충격과 소성충격을 구분짓는 스포링속도에 대한 개념을 제시하였다. 본 논문은 충격을 받는 철근콘크리트 구조물의 벽체설계에 유용한 토대를 제공할 것으로 사료된다.

Abstract

Concrete containment walls and barrier walls of internal and external facilities in safety-related structures such as nuclear power plants are required to be designed to withstand the effects of impact loads. These impact forces may cause serious damage to the walls and result in a failure of major structures. The important phenomena of penetration, perforation and scabbing must be therefore considered in the design of those structures that are subject to impact loads.

The present study focuses on the local and global behavior of reinforced concrete walls under impact loads. A method of calculating the penetration depth under impact forces is derived. Theoretical formulas for the penetration depth and perforation thickness under impact forces are also proposed. The concept of critical spalling velocity under elastic and plastic contacts is also discussed. The present study allows more realistic analysis and design of reinforced concrete structures under impact loads.

Keywords : Impact loads, impact analysis, reinforced concrete walls, penetration, perforation, scabbing, nuclear power plants, spalling velocity, local and global behavior.

* 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

1. 서론

토목구조물의 설계에 있어서 매우 안전이 요구되는 구조물은 우연히 혹은 부주의한 사고로 인하여 발생하는 비산물체에 의한 충격을 충분히 저항할 수 있도록 설계되어야 한다. 이같은 충격저항설계에 고려되고 있는 충격체는 강봉, 강과이프, 자동차 등의 돌풍으로 유발되는 충격체(tornado-generated missile)와 내부 시설물의 우연한 폭발로 유발되는 사고성 충격체(accident-generated missile) 및 항공기 충돌(aircraft crash) 등으로 구별된다.(1~5)

이러한 물체에 의한 충격효과는 충격부분에 나타나는 국부효과(local effect)와 구조물의 전체거동에 영향을 주는 전반응답(overall response)으로 대별할 수 있다.

충격해석은 실제적으로 국부효과와 계산 및 충격하중 함수의 결정을 말하는 것으로 1990년대 이후로 이에 대한 실험 및 이론적인 연구가 진행되어왔다. 초기에는 군사적 목적으로 군용유도탄을 철근콘크리트 방어벽에 충돌시켜 국부효과를 실험적으로 계산하였는데 이는 주로 관심의 대상이 되는 원자력발전소에서 발생하는 500ft/sec이하의 저속 충격체에는 잘 맞지 않았으며, 이론적 근거도 부족하였다. 이같은 단점을 해결하기 위하여 충격이론에 근거하여 국부효과와 계산식을 유도한 후 부족한 부분을 실험결과를 통해 보완한 반이론식이 제안되었고 거듭 발전해왔다. 또한 전반응답을 결정하기 위한 충격하중 곡선도 여러가지 근사적인 방법으로 제안되었지만 아직까지 실제 실험결과를 명확히 설명해 주지는 못하고 있는 실정이다.(1~14)

본 논문에서는 국부효과 발생시 동시에 진행되는 탄성효과(elastic effect) 및 전반응답효과를 고려한 관입깊이의 계산식을 유도하였다. 또한, 관통두께(perforation thickness)의 계산 및 스폐링속도(spalling velocity)에 대한 개념도 제시하였다. 그리고 실험결과와 기존의 식 및 제안식에 의한 결과를 수치적으로 비교하였다.

2. 충격해석의 기본이론

충격해석은 크게 나누어 국부해석효과(local-effect analysis)와 전반거동효과(overall-response effect)로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 이 두가지 효과를 모

두 고려하였으며, 특히 국부효과 이론을 중점적으로 유도하였다.

2.1 국부효과

일반적으로 충격체에 의해 콘크리트벽체에 발생하는 손상은 Fig.1에서와 같이 충격접촉면 및 벽 뒷면에 콘크리트가 조각으로 떨어져나가는 스폐링(spalling) 및 스캐빙(scabbing), 충격체의 벽면관입(penetration), 벽체관통(perforation) 등으로 구분한다.

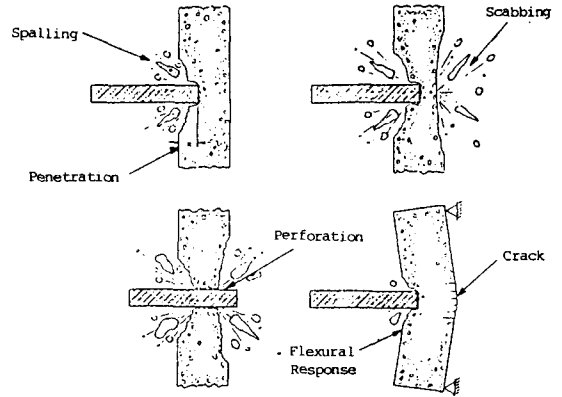


Fig.1 Damage patterns by a impact missile

국부효과를 계산하기 위해 제안된 식들은 Table 1에서 보는 바와 같이 여러가지가 있으나 실험식이나 반실험식이 대부분이다. 이 식들은 다음 세가지의 방법 가운데 한가지 방법에 의해서 국부효과를 계산하고 있다.

(a) 충돌체 및 벽의 성질을 이용하여 실험적 또는 반실험적으로 관입깊이를 예측한 후 관통 및 스캐빙두께를 관입깊이의 함수로 표시하는 방법.

(b) 관통 또는 스캐빙현상에 의한 실험자료를 이용하여 충돌체 및 벽의 성질을 직접 관통 및 스캐빙두께와 상호 관련시키는 방법.

(c) 관통 및 스캐빙두께와 충돌체 및 벽의 성질과의 관계에 대한 이론적인 모델을 만들어 이를 예측한 후 실험자료를 통해 보완하는 방법.

이들 방법중 가장 이론적으로 타당하고 바람직한 방법은 (c)의 경우로서 본 논문에서는 이 방법을 택하였다.

국부효과에 대한 제안식으로서 충격체에 의한 충격실험결과와 가장 근사한 계산값을 보여주는 식은 NDRC (National Defense Research Committee)의 식(1)~(3)

Table 1. Comparisons of characteristics of various impact formulas

Formulas	Penetration	Perforation	Scabbing	Remarks		
				E	(a)	B
Petry	○	○	○	E	(a)	B
ACOE	○	○	○	E	(a)	B
NDRC	○	○	○	S	(a)	B
Ammann & Whitney	○	×	×	E	(a)	B
BRL	×	○	○	E	(b)	B
Bechtel	×	×	○	E	(b)	T
Stone & Webster	×	×	○	E	(b)	T
C.E.A./ E.D.F.	×	○	×	E	(b)	T
Chang	×	○	○	S	(c)	T
Degen	×	○	×	S	(a)	T
Haidar	○	×	×	S	(a)	T
Huges	○	○	○	S	(a)	T

Note: E=Empirical formula, S=Semi empirical formular. (a), (b), (c)--evaluation method
 B=Ballistic missile, T=Tornado generated missile.

과 Hughes의 식(4)~(6)이 있다.^(6~8)

$$x = \sqrt{4KNWd \cdot \left(\frac{V_0}{1000d}\right)^{1.8}}, \text{ 단 } \frac{x}{d} \leq 2.0 \quad (1)$$

$$x = KNW \cdot \left(\frac{V_0}{1000d}\right)^{1.8} + d, \text{ 단 } \frac{x}{d} \geq 2.0$$

$$\frac{e}{d} = 3.19 \frac{x}{d} - 0.718 \left(\frac{x}{d}\right)^2, \text{ 단 } \frac{x}{d} \leq 1.35 \quad (2)$$

$$\frac{e}{d} = 1.32 + 1.24 \frac{x}{d}, \text{ 단 } 1.35 \geq \frac{x}{d} \geq 13.5$$

$$\frac{s}{d} = 2.12 + 1.36 \frac{x}{d}, \text{ 단 } 0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.75 \quad (3)$$

$$\frac{s}{d} = 7.91 \frac{x}{d} - 5.06 \left(\frac{x}{d}\right)^2, \text{ 단 } \frac{x}{d} \geq 0.65$$

$$\frac{x}{d} = 0.19 k \frac{I}{s}, I = \frac{mV_0^2}{d^3 f_1}, s = 1 + 12.3 \ell_n(1 + 0.03I) \quad (4)$$

$$\frac{h_p}{d} = 1.58 \frac{x}{d} + 1.4 \text{ if } I < 40, \frac{h_p}{d} = 3.6 \frac{x_p}{d} \quad (5)$$

$$\frac{h_s}{d} = 1.74 \frac{x}{d} + 2.3 \text{ if } I < 40, \frac{h_s}{d} = 5.0 \frac{x_p}{d} \quad (6)$$

상기의 식에서 (1), (4)식은 관입깊이 x를, (2), (5)식은 관통두께 e(또는 h_p)를, (3), (6)식은 스캐빙두께 s(또

는 h_s)를 계산하는 방법을 나타내고 있다. NDRC의 식에서 k는 관입계수를, N, W, d, v는 각각 충돌체의 충돌면 형상계수, 무게, 직경, 충격속도를 나타내고, Hughes의 식에서 α, I는 각각 충돌면 형상계수, 충격계수를, m, f₁은 충격체의 질량 및 콘크리트 벽체의 파괴강도를 나타낸다.

여기서 k와 f₁은 다음 식(7)에 의해 구한다.

$$k = 180/\sqrt{fc^2}, \quad f_1 = 7.5\sqrt{fc^2} \quad (7)$$

NDRC의 제안식은 실험결과와 잘 일치하지만, NDRC의 식에서 유도된 충격속도 대 관입깊이의 관계식(impact velocity-penetration depth relation) 및 충격하중-시간함수(impact load-time function)가 실제현상과 잘 안맞기 때문에, 본 논문에서는 Hughes의 식을 토대로 탄성효과와 콘크리트벽체의 전반응답효과를 고려한 국부효과와 계산식을 제시하였다.

2.2 충격하중-시간함수

충격하중-시간함수는 충격체가 벽체에 충돌할 때 충격접촉면에 발생하는 힘을 시간의 함수로 표시한 것으로서, 벽체를 동해석하여 전반응답을 계산하고자 할 때 사용된다. 지금까지 제안된 함수식들의 공통점은 이론에 근거하고 있지 못하며 실험결과를 통해 보완한 경우가 대부분이다.

Fig.2는 각 제안식들을 잘 비교하여 나타내주고 있다. 그림에서 McMahon, Meyers 및 Buchert가 제안한 식이나 Rotz, William, Alvy가 제안한 식은 실험결과로 얻어진 그래프와 잘 맞지 않으나 Hughes나 Kar가 제안한 함수형태는 비교적 잘 맞는다.

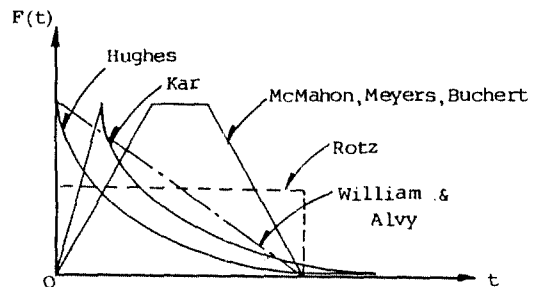


Fig.2 Impact loads-time function

$$F(t) = F_s / (1 + \frac{v_0 t}{2x}) \quad (8)$$

$$F_s = (\frac{\pi d^2}{4}) \cdot (\alpha S f_r), \quad \alpha = \text{실험상수} \quad (9)$$

식(8), (9)는 Hughes의 충격하중-시간함수식으로 변수 x 는 충격체의 관입깊이를, F_s 는 충격접촉면에 발생하는 충격하중의 최대값 혹은 스폴링힘(spalling force)을 의미한다. 그러나 Kar가 제안한 곡선은 탄성충돌의 원리를 적용하였기 때문에 관입등소성충격의 일반적 현상을 잘 설명해주지 못하는 단점이 있으며, Hughes가 제안한 곡선은 하중지속시간(load duration)과 충격후 압력의 순간적인 상승에 대해서 잘 설명하지 못하고 있다.

2.3 전반응답

2.1절에서 언급한 국부효과 이외에 충격을 받는 구조물을 해석할 때 고려해야 할 사항으로 전반응답이 있다. 전반응답의 영향을 효과적으로 평가하는 방법에는 2.2절에서 결정된 함수식을 이용한 동해석법과 충격에너지의 개념을 이용한 방법이 있다.

전자는 유한요소법을 이용한 방법과 벽체를 단일 자유도계로 가정해서 벽체의 운동방정식을 푸는 근사적인 방법을 말한다. 후자는 충격체와 벽체의 탄성충돌의 원리를 적용한 방법이다. 충격체의 질량을 M_m , 벽체의 등가질량을 M , 그리고 충격속도를 v_0 라 할 때, 벽체에 흡수되는 충격에너지 E_t 는 식(10)과 같이 주어진다.⁽⁶⁾

$$E_t = \frac{M_m^2 v_0^2}{2(M_m + M)} \quad (10)$$

이 방법은 벽체의 E_t 값이 벽체의 변형에너지능력(strain energy capacity)보다 크면 휘파괴가 발생한다는 개념을 이용한 방법이다. 연구된 바에 의하면 후자의 방법이 전자의 방법보다 벽체에 충격피해를 과대평가하는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 국부효과와 계산시에 고려하게 될 전반응답을 평가하는데 있어서 전자의 방법을 선택하였다.

3. 철근콘크리트 벽체의 충격이론 유도

본 논문에서는 2장에서 언급된 충격현상에 대한 해석 가운데, 실제로 벽체에 직접적인 피해를 주는 국부효과에 대한 충격이론을 유도하였다. 그 과정은 첫째로, 관입깊이를 충격체 및 벽체의 충격인자의 함수로서 표시하고 이에 따라 관입깊이를 계산하며, 둘째로, 관통두께를 관입깊이의 함수로 표시하였다.

3.1 관입깊이의 계산

본 논문에서는 관입깊이를 유도하는데 있어서 다음 4가지의 기본가정을 두고 충격에 의한 관입깊이를 유도하였다.

- (1) 충격도중 충격체는 변형되지 않는다(비 변형충격).
- (2) 콘크리트 벽체의 철근량에 의한 영향은 미려한 것으로 본다(연구 및 실험에 의하면 설계시 일반적으로 고려되는 철근량의 범위내에서는 철근량의 다소가 관입깊이값에 큰 영향을 주지 않는 것으로 알려져 있다. 다만, 철근량이 많을 때는 관통이나 스케빙에 약간의 지연효과를 줄 뿐이다. 따라서 본 논문에서는 벽체의 환산단면을 사용하여 철근을 콘크리트의 특성속에 포함시켰다).
- (3) 충격체는 벽체에 수직으로 입사한다(수직충격).

Fig.3은 충격체의 관입과정을 단계적으로 나타내고 있다. 관입깊이를 계산하기 위해서 충격하중 F 와 충격이 진행되는 동안의 관입깊이 x 를 Fig.4와 같이 가정하면 이들의 관계식은 식(11)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} F &= k x^{(3/2)} && \text{단 } x \leq x_s \\ F &= F_s \left(1 - \frac{x - x_s}{x_p - x_s}\right)^2 && \text{단, } x \geq x_s \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

여기서, k 는 접촉강도(contact stiffness)를, x_p 는 최종 관입깊이를 의미한다. 또한 F_s 는 스폴링힘(spalling force)을, x_s 는 스폴링 깊이(spalling depth) 또는 탄성접촉 깊이(elastic contact depth)를 의미한다. 이때, 스폴링힘은 식(12)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_s = \alpha f_r \cdot S \cdot (\pi d^2/4) \quad (12)$$

여기서, d 는 충격체의 직경을 나타내고 αf_r 은 콘크리트의 지압강도를 나타내며 직접 인장강도 f_r 에 상수 α 를

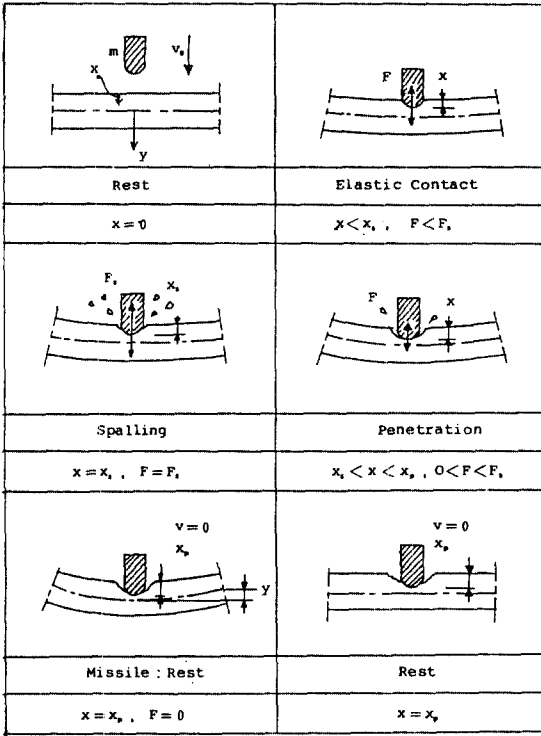


Fig.3 Impact process

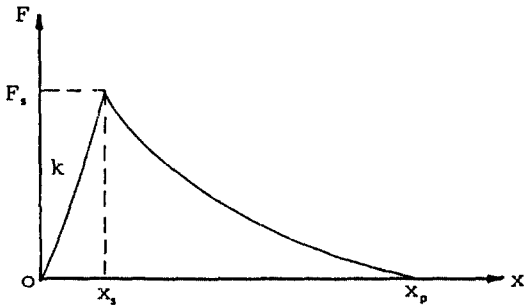


Fig.4 Impact loads-penetration depth curve

굽한 형태로 표시하였다. 그리고 S는 충격체의 속도를 고려한 동확대계수를 의미하는 것으로 충격속도가 0일 때 1의 값을 갖도록 표시할 수 있으며, 실험결과와 회귀 분석을 통해 얻을 수 있다. 스포링힘 F_s 는 스포링이 일어나는 순간 즉 콘크리트의 지압강도가 충격강도보다 작을 때 접촉면에 작용하는 힘을 의미한다.

스포링깊이 x_s 는 식(11)과 Fig.4로부터 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Spalling depths for various missile nose shapes

R	Blunt nose(d/2)	Sharp nose(3d/2)	Flat nose
			$R \rightarrow \infty$
k. (kips-in ^{-3/2})	$3135.34/\bar{d}$	$5430.57/\bar{d}$	$R \rightarrow \infty$
x_s . (in)	$(F_s \bar{d}^{1/2}/3135.34)^{2/3}$	$(F_s \bar{d}^{1/2}/5430.57)^{2/3}$	$R \rightarrow 0$

$$F_s = k x_s^{(3/2)}, \quad x_s = \left(\frac{F_s}{k}\right)^{(2/3)} \quad (13)$$

접촉강도 k는 Hertz의 탄성 접촉이론에 의해 구한다. 충격체의 충돌면 형상계수(nose shape)에 따라서 k값은 각각 다른데 Table 2에서는 형상이 반구형(blunt nose ($R=d/2$)), 예리한 형(sharp nose($R=3d/2$)), 편평한 형(flat nose($R \rightarrow \infty$))일 때에 대하여 나타내고 있다. 일반적으로, 충격현상을 에너지보전의 개념으로 표시하면 식(14)와 같다.

$$E_m = E_{local} + E_{overall} \quad (14)$$

즉, 충격에너지는 국부효과와 전반응답으로 인하여 소모된 에너지의 합으로 나타낼 수 있다. 식(11)을 이용하여 식(14)를 다시 쓰면 식(15)로 쓸 수 있는데,

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \int_0^{x_p} kx^{(3/2)} dx + \int_{x_s}^{x_p} F_s \left(1 - \frac{x-x_s}{x_p-x_s}\right)^2 dx + u \quad (15)$$

여기서, 좌측항은 충격체의 운동에너지를 의미하고, 우측항의 처음 2번째항은 국부효과를, 3번째항은 벽체의 휨 거동에 의한 변형에너지를 의미한다. 한편 식(13)을 식(15)에 대입하여 k를 소거하고, 이 식을 관입깊이 x_p 의 식으로 나타내면 다음 식(16)과 같이 유도된다.

$$x_p = \frac{3mv_0^2}{2F_s} - \frac{3u}{F_s} - \frac{x_s}{5} \quad (16)$$

이 식을 간단하게 하기 위해서 충격의 정도를 나타내는 인자로서 충격계수 I를 식(17)과 같이 정의한다.

$$I = \frac{mv_0^2}{d^3 f_r} = \frac{W v_0^2}{g d^3 7.5\sqrt{f'_c}} \quad (g = 386.4 \text{ in/sec}^2) \quad (17)$$

(무차원 량)

이 식과 식(12)를 식(16)에 대입하여 정리하면 식(18)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{x_p}{d} = \frac{6I}{\pi \alpha S} - \frac{3u}{F_s d} - \frac{x_s}{5d} \quad (18)$$

이 식은 관입깊이 x_p 를 충격체의 지름 d 로 나누어 무차원량으로 나타내었는데, 식우측의 2번째항과 3번째항은 각각 전반효과와 탄성효과에 영향을 의미하는 부분이다.

식(18)에서 변수 u , α , S 등은 아직 결정되지 않은 값들로서 다음과 같은 방법을 이용하여 그 값을 계산하였다.

변형에너지 u 는 2.3절에 설명된 바와 같이 벽체를 단일자유도계로 가정하여 그 운동방정식을 풀므로써 계산하였는데, 이때 사용한 충격하중-시간함수식 $F(t)$ 는 Fig.5처럼 근사적인 삼각형 형태로 가정하였다. 여기서, F_s 는 식(12)에서 알 수 있듯이 미지수 α , S 의 식으로 정의되어 있어 그 값들을 알 수 없다. 따라서, Hughes가 제안한 다음식을 초기치로 사용하여 반복계산을 수행하여 α , S 를 결정하였다.

$$F_s = \frac{3mv_o^2}{2x_{test}} \quad (19)$$

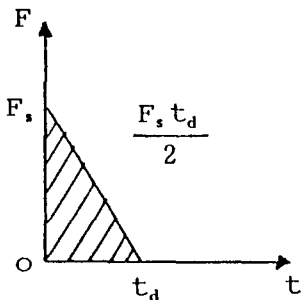


Fig.5 Approximate impact loads-time function curve

여기서, x_{test} 는 최종 관입깊이에 대한 실험결과치를 의미한다. 그리고, 충격 지속시간 t_d 는 충격전후에 운동량 보존법칙으로부터 얻은 $t_d = 2mv_o/F_s$ 의 값을 사용하였다.

마지막으로, 변형에너지 u 는 운동방정식에서 계산된 벽체의 처짐값으로부터 결정하였다. 한편, 변수 α 와 S 의 값은 기존의 실험자료를 회귀분석하여 얻었다. 계산에 사용된 실험자료는 Sliter의 “철근콘크리트 벽체의 충격 실험” 결과치들로서 Table 3은 각각 다른값의 충격인자(35가지)를 정하여 얻은 관입깊이의 실험값들을 보여주고 있다.

α 와 S 를 계산하기 위해 식(12)를 식(18)에 대입하고 관입깊이 x_p 를 실험결과값 x_{test} 로 바꾸어 쓰면 식(20)과 같이 정리할 수 있다. 여기서, 충격체의 형태가 flat nose 형이므로 Table 2에서 보듯이 탄성접촉에 의한 스폴링은 없어진다. 따라서,

$$\frac{x_{test}}{d} = \frac{A - B \cdot u}{\alpha \cdot S} \quad (20)$$

$$\text{여기서, } A = \frac{6I}{\pi}, \quad B = \frac{12}{\pi d^3 f_r}$$

이 식에서 x_{test} , A , B , u , d 등의 값은 Table 3의 충격인자들을 각각 대입하여 계산하고, 여기서, 얻은 35개의 α S 값을 회귀분석한 결과를 식으로 표현하면 식(21)과 같이 충격계수 I 의 함수로 정해진다.

$$\alpha \cdot S = 10^{0.85 + 0.6315 \log_{10} \sqrt{1+300I}} \quad (21)$$

충격속도가 0일 때 즉, 벽체가 충격체에 정적하중(static load)으로 작용한다고 가정할 때, I 의 값은 0이므로 α S 는 $10^{0.86}$ (7.0)임을 알 수 있다.

그런데 식(12)에서 동확대계수 S 는 속도가 0일 때 1의 값으로 정의하였으므로 α 의 값은 7.0임을 알 수 있다.

따라서, 관입깊이의 계산식은 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\frac{x}{d} = \frac{6I}{\pi \alpha S} - \frac{3u}{F_s d} - \frac{x_s}{5d} \quad (22)$$

$$u = f(\alpha S), \quad F_s = \alpha S f_r (\pi d^2/4)$$

한편, 위의 결과로부터 충격속도와 관입깊이와의 관계식을 유도하면 식(23)과 같이 나타낼 수 있다(Fig.6 참조).

$$v = v_s \left(1 - \frac{x - x_s}{x_p - x_s} \right)^{(-3/2)}, \quad v_s = \sqrt{v_o^2 - \frac{4}{5} \cdot \frac{F_s x_s}{m}} \quad (23)$$

이 식에서, v_s 는 스폴링이 발생하는 순간의 속도를 의미한다.

3.2 관통두께의 계산

벽체가 어느 충격체로 인한 관통에 저항할 수 있는 최소의 두께 즉, 관통두께는 3.1절에서 언급한 스폴링힘과

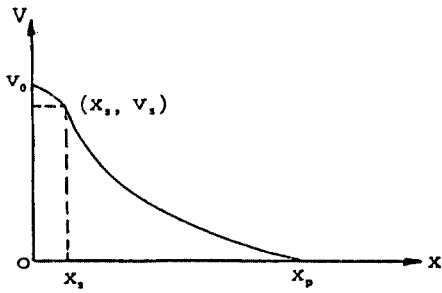


Fig.6 Impact velocity-penetration depth curve

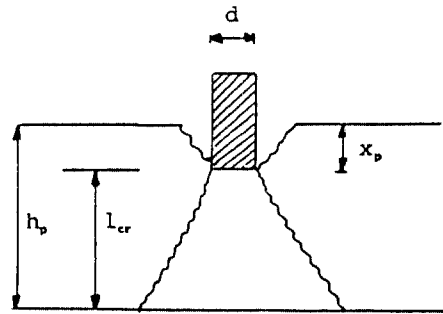


Fig.7 Analysis model for perforation of a wall

Table 3. Experimental results for penetration depths by Sliter

Missile parameter			Target parameter			Observed local effects	
Weight (lbs)	Diameter (in)	Velocity (ft/sec)	Thickness (in)	Strength (psi)	Thickness /Diameter h/d	Penetration depth (in)	Depth/Diameter X/d
213.00	8.00	161	18.0	4500	3.25	2.00	0.25
213.00	8.00	295	24.0	4775	3.00	3.00	0.38
12.50	3.00	89	4.5	3210	1.50	0.19	0.06
12.70	3.00	101	6.0	3820	2.00	0.15	0.05
12.70	3.00	135	6.0	3820	2.00	0.13	0.04
12.60	3.00	183	6.0	4400	2.00	0.37	0.12
23.50	3.00	95	6.0	3820	2.00	0.19	0.06
8.04	1.00	150	6.0	4810	6.00	1.20	1.20
8.04	1.00	213	6.0	5910	6.00	1.60	1.60
8.04	1.00	220	6.0	5940	6.00	2.00	2.00
8.04	1.00	203	9.0	5760	9.00	1.70	1.70
8.00	1.00	303	18.0	3650	18.00	3.60	3.60
8.00	1.00	435	12.0	3545	12.00	5.80	5.80
2.45	1.77	544	9.1	4725	5.14	1.69	0.95
2.45	1.77	538	9.1	4970	5.14	1.81	1.02
2.45	1.77	495	9.1	5175	5.14	1.53	0.86
2.45	1.77	554	9.1	5855	5.14	1.61	0.91
2.45	1.77	688	9.1	4725	5.14	2.16	1.22
2.45	1.77	675	9.1	4970	5.14	2.28	1.29
2.45	1.77	711	9.1	5175	5.14	2.32	1.31
2.45	1.77	675	9.1	5855	5.14	2.28	1.29
4.96	1.77	508	9.1	4725	5.14	2.68	1.51
4.96	1.77	508	9.1	4970	5.14	3.07	1.73
4.96	1.77	515	9.1	5175	5.14	2.79	1.58
4.96	1.77	515	9.1	5855	5.14	2.79	1.58
1.97	1.57	915	13.8	6088	8.79	2.28	1.45
1.97	1.57	741	15.7	5533	10.00	2.32	1.48
1.97	1.57	479	15.7	5136	10.00	1.57	1.00
1.97	1.57	768	15.7	6103	10.00	2.36	1.50
1.01	1.57	479	13.8	5533	8.79	1.02	0.65
1.01	1.57	538	15.7	5733	10.00	1.22	0.78
1.01	1.57	955	15.7	5733	10.00	1.73	1.10
0.24	0.79	833	9.8	6131	12.41	0.98	1.24
0.26	0.79	623	11.8	6131	14.94	0.94	1.19
0.26	0.79	909	11.8	5719	14.94	1.30	1.65

(주 : 1 inch=2.54cm, 1 ft=30.48cm, 1 psi=0.07kg/cm²)

벽체의 펀칭강도와와의 상관관계에 따라 정해지며, Fig.7 과 같은 관통모델을 가정하면 관통두께 h_p 는 식(24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_p = x_p + \ell_{cr}, \quad \frac{\ell_{cr}}{d} = a_1 \left(\frac{x_p}{d}\right)^{a_2} + a_3 \left(\frac{x_p}{d}\right) \quad (24)$$

여기서, ℓ_{cr} 은 벽체후면까지의 균열전과 길이이다.

Sliter의 관통에 대한 실험자료로부터 회귀분석을 통해 미지수 a_1, a_2, a_3 를 정하면 관통두께의 계산식은 다음과 같이 제안할 수 있다.

$$\frac{h_p}{d} = 3.6163 \left(\frac{x_p}{d}\right)^{0.6} + 0.2286 \left(\frac{x_p}{d}\right) \quad (25)$$

3.3 탄성충격과 소성충격의 구분

탄성충격과 소성충격의 차이점은 충격에 의해 관입이 일어났느냐 안일어났느냐에 있다. 탄성충격은 콘크리트벽체에 아무런 국부손상이 없이 벽체는 휨거동을 하고 충격체는 벽체로부터 튕겨나가는 현상을 의미한다.

Hertz의 탄성충격이론에 의하면 충격시 벽체에 작용하는 충격하중은

$$F_m = k \left(\frac{5mv_o^2}{4k}\right)^{(3/5)} \quad (26)$$

로 주어진다. 충격하중 F_m 이 스포링힘 F_s 와 같다는 조건으로부터 두 충격의 경계가 되는 속도를 시산법으로 구할 수 있다. 이 속도를 임계 스포링속도(critical spalling velocity) V_s 라 규정하면, 충격속도 V 가 이 값보다 클 때 스포링이 일어난 후 관입이 시작됨을 의미한다.

Fig.8은 충격체의 무게와 직경이 각각 2.45lb, 1.77in

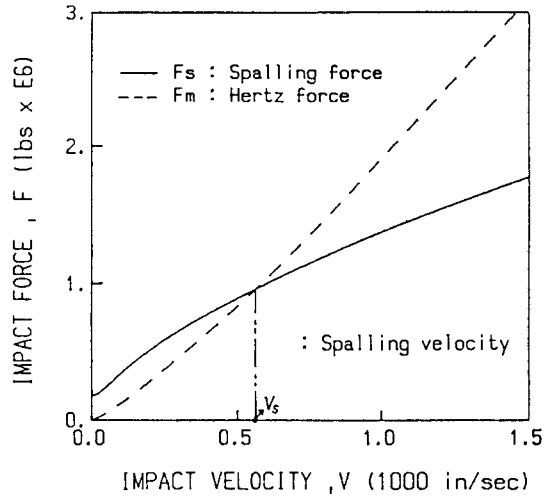


Fig.8 Relation between Hertz force and spalling velocities

이고, 벽체의 압축강도와 두께가 5,000psi, 9.1 in일 때 V_s 가 49 fps임을 나타낸 그림이다.

4. 해석 예

Table 4 및 Table 5는 관입깊이의 계산과정에 대한 실례를 보여주고 있다. 여기서, 벽체의 국부효과(관입, 관통) 계산시 탄성효과 및 전반응답효과는 상대적으로 작음을 수치적으로 보여주고 있다. 충격속도가 증가할 때 이 두 효과의 수치는 커지지만, 관입깊이에 미치는 영향은 상대적으로 작음을 알 수 있다.

5. 결과분석 및 비교평가

본 논문에서 제안된 관입깊이와 관통두께의 계산식을 기존의 식과 비교평가하기 위해서 Fig.9~Fig.14로 나타냈다.

Table 4. Various parameters for missile and wall

Missile characteristics		Reinforced concrete plate		Impact condition	
Overall shape	Slug	Plate size & thickness	10ft square, 2ft	Plastic impact	
Nose shape	Sharp nose	Supports	clamped edge		
Diameter	8 in	Rebar arrangement	both sides & directions	Rigid impact	
Material & Elastic modulus	Steel $E=30 \times 10^6$ psi	Reinforcement ratio	Comp.=tens. 0.0075		
Weight	213 lb	Cover	2 inch	Low velocity impact	
		Compressive strength	4,500 psi	Impact location	Center of plate
		Yield strength	40,000 psi	Incident angle	Normal(90°)
		Poisson's ratio	$\nu_1=1/6, \nu_2=1/3$	Yaw	Straight

(1 inch=2.54cm, 1 ft=30.48cm, 1 psi=0.07kg/cm²)

Table 5. Calculation results for penetration depths

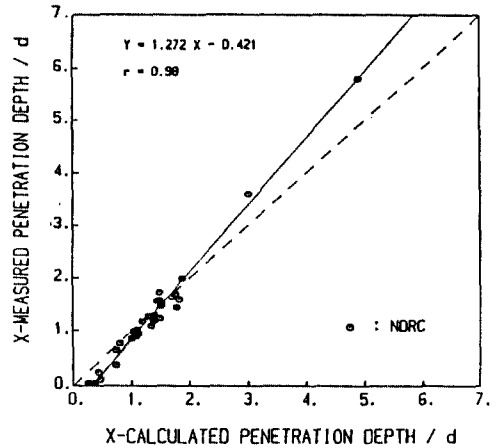
Items	Calculated results
Impact factor I	26.81
Dynamic magnification factor S	17.18
t_i/T	0.356
R_o/F	0.589
Flexibility μ	0.83
Strain energy U	35.659(lb-in)
Spalling depth x	0.499(in)
Elastic effect(x _e)	0.100(in)
Overall effect(x _o)	0.035(in)
Penetration depth(x _p)	4.160(in)
Perforation thickness(h _p)	21.820(in)
Design thickness(1.2h _p)	26.184(in)

(주: 1 inch=2.54cm, 1 ft=30.48cm, 1 psi=0.07kg/cm²)

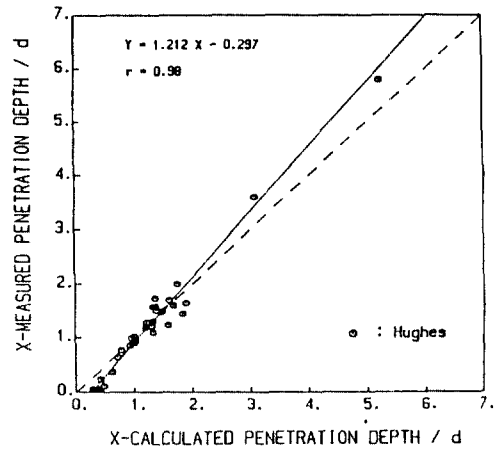
Fig.9는 관입깊이의 실험값과 계산값의 상관도를 나타내고 있다. 이 그림에서 NDRC와 Hughes 및 본 연구의 제안식 모두 직선식으로 회귀되어 있다. 그러나, 기존의 두식에 비해 제안식이 실험값에 더 가깝게 근사되어 있는 것을 알 수 있다. Fig.10은 계산치를 실험치로 나눈 비를 보여주고 있는데, 관입깊이를 충격체의 직경으로 나눈비가 0.5이하일 때, NDRC 및 Hughes의 식은 그 비가 최고 8에서 9이나 제안식은 3에서 4로 보다 실험값에 가까움을 알 수 있다. Fig.11은 충격계수와 관입깊이의 관계를 보여주고 있는데 Hughes의 식과 제안식을 잘 비교해주고 있다. Fig.12는 충격속도와 관입깊이의 관계를 보인 것인데 Petry와 AOCE의 식은 실험값에 비해 과대평가된 식이며, Ammann & Whitney의 식은 과소평가된 식임을 알 수 있다. 그러나, NDRC의 식 및 제안식은 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. Fig.13은 식(24)를 그림으로 표현한 것으로서, 실선은 관입만 일어나는 경우와 관통이 일어나는 경우를 구분하는 경계선을 의미한다. Fig.14는 관통두께의 계산식을 기존의 식과 비교한 것으로서, 관통두께와 충격체의 직경과의 비(h_p/d)가 3이하인 범위에서 제안식이 기존의 식보다 안전측의 값을 나타내고 있음을 보여주고 있다.

6. 결론

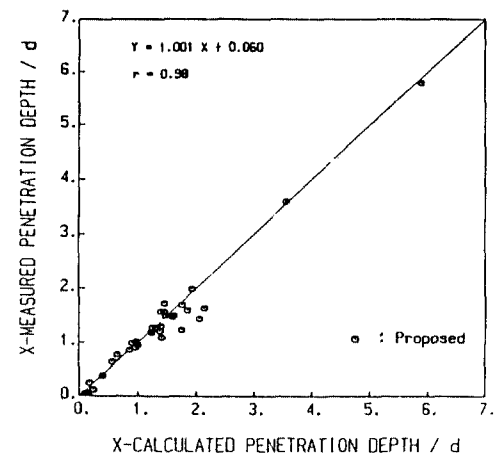
본 논문에서는 우연한 사고로 인하여 발생한 충격체가 철근콘크리트 벽체에 충돌하였을 때, 나타나는 두가



(a)



(b)



(c)

Fig.9 Comparisons of calculated penetration depths with test data

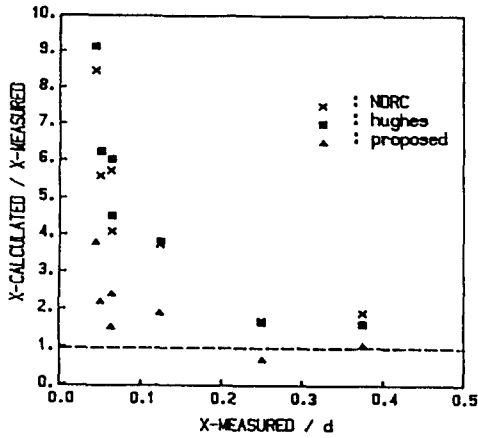


Fig.10 Ratios of calculated penetration depths to observed ones

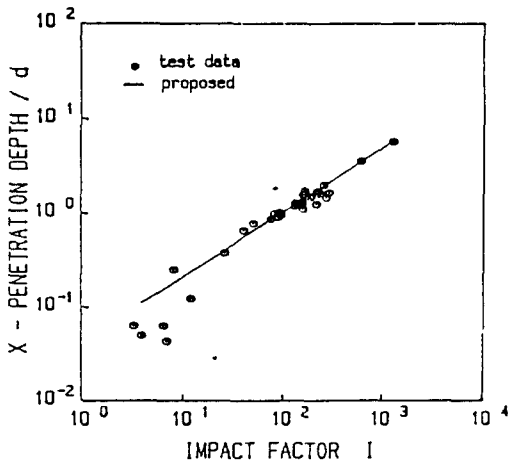
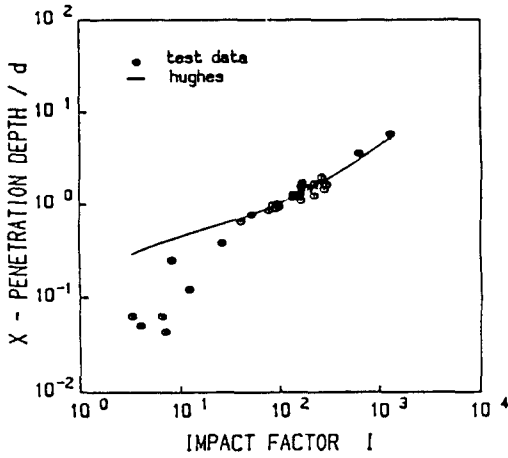


Fig.11 Penetration depths according to impact factor I

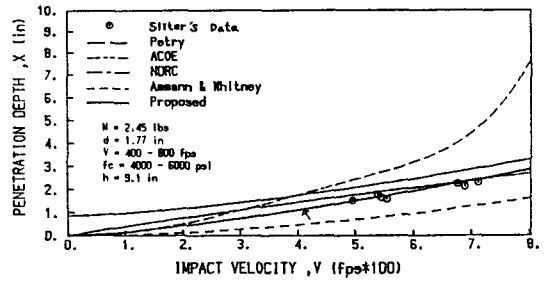


Fig.12 Comparisons of various formulas for penetration depths

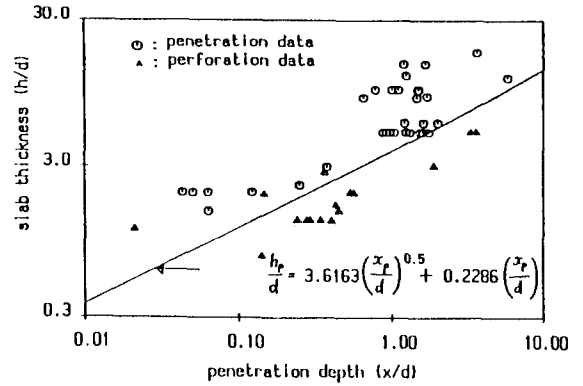


Fig.13 Relationship between penetration depth and slab thickness

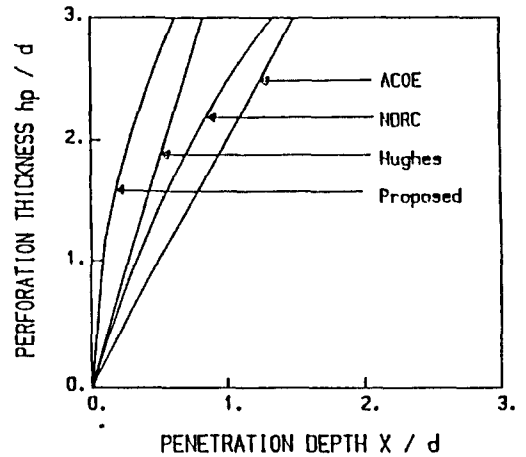


Fig.14 Comparisons of various formulas of perforation thickness

지 효과로서 국부효과와 전반응답의 현상을 설명하고 이에 대한 해석방법에 대하여 연구하였다. 국부효과에 대한 해석으로서 관입깊이 및 관통두께의 계산식을 제안하였고, 탄성충격과 소성충격을 비교 구분하였다. 본

연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 본 연구에서는 철근콘크리트벽체가 충격체에 의해 충격을 받았을 때 관입현상과 관통현상을 규명할 수 있는 이론식을 제안하였다.

2. 철근콘크리트벽체에 발생하는 관입에 대하여, 그 깊이의 계산방법에 대한 기존의 실험식 및 반실험식들과의 비교평가로부터 본 연구에서 제안된 식이 관입깊이를 더 잘 예측하고 있음을 알 수 있었다.

3. 관입깊이의 계산시 탄성효과와 전반응답 효과를 고려하므로써 좀더 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 해석 예를 통한 관입깊이 및 관통두께의 계산과정으로부터 이 두가지 효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

그러나, 충격 메카니즘의 해석방법에 대한 충분한 이론 및 실험적 연구가 이 분야에서 앞으로 더 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국 학술진흥재단의 자유공모 과제 학술연구에 의하여 연구되었으므로 이에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Haldar, A., and Hussein, A.H., "Local effect of solid missiles on concrete structures," *Journal of Structural Eng.*, ASCE, Vol.110, No.5, May, 1984, pp.948-960.
2. Kar, A.K., "Impactive effect of tornado missiles and aircraft," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.105, No.ST11, Nov.1979, pp.2243-2260.
3. Kar, A.K., "Projectile penetration into buried structures," *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol.104, No.ST1, Jan., 1978, pp. 125-139.
4. Haldar, A., and Miller, F.J., "Penetration depth in concrete for nondeformable missiles," *Nuclear Engineering & Design*, Vol.71, No.

- 1-3, 1982, pp.79-88.
5. Sliter, G.E., "Assessment of empirical concrete impact formulars," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.106, No.ST5, May 1980, pp.1023-1045.
6. Hughes, G., "Hard missile impact on reinforced concrete," *Nuclear Engineering & Design*, Vol. 77, No.1-3, 1984, pp.23-35.
7. Haldar, A., Hatami, M., and Miller, F.J., "Concrete structures: penetration depth estimation," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 109, No.1, Jan., 1983, pp.245-250.
8. McMahon, P., Mayers, B.L., and Buchert, K. P. "Impact of deformable missiles on concrete walls," *Journal of the Power Division*, ASCE, Vol.104, No.2, April, 1978, pp.183-197.
9. Degen, P.O., "Perforation of reinforced concrete slabs by rigid missiles," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.196, No.ST7, July, 1980, pp.1623-1642.
10. Chang, W.S., "Impact of solid missiles on concrete barriers," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.107, No.ST2, Feb., 1981, 257-271.
11. Kennedy, R.P., "A review of procedures for analysis and design of concrete structures to resist missile-impact effects," *Nuclear Engineering & Design*, Vol.37, 1976, pp.183-203.
12. Zukas, J.A., "Impact dynamics," *John Wiley & Sons*, 1982.
13. Haldar, A., "Turbine missile—a critical review," *Nuclear Engineering & Design*, Vol.55, No.3., Nov., 1979, pp.293-304.
14. Haldar, A., "Impact-loading-damage predicting equation," *Proceedings, Sixth Conf. on Struc. Mech. in Reactor Tech. (SMIRT-6)*, Paper No. J 8/4, Paris, France, Aug., 1981.

(접수일자 : 1992. 3. 23)