AEM을 이용한 철근콘크리트 라이닝의 관입 방호성능 평가

주건욱*

정회원, 국방과학연구소 연구원

The evaluation of penetration protective performance using applied element method for reinforced concrete lining

Gun-Wook Joo*

Researcher, Agency for Defense Development

***Corresponding Author :** Gun-Wook Joo, clucio@add.re.kr

Abstract

Explosion after penetration of a warhead in an underground structure generally causes considerable displacement, breakage and extensive damage to the target. Therefore, in order to reduce the damage effect, it is required to design an underground structure protection against penetration. In this study, major factors for improvement of penetration protection performance of reinforced concrete underground structures using applied element method are divided into strength (concrete UCS) and density (concrete thickness, reinforcement layers, reinforcement diameters, reinforcement spacings). Based on these major factors, this study performed numerical analysis of simulation of dynamic response by penetrators under various conditions and analyzed the results. The results of this study are expected to be used as basis materials to improve penetration protection performance of reinforced concrete underground structures.

Keywords: Penetration, Protective design, Reinforced concrete underground structure, Applied element method, Extreme loading for structure

초 록

지하구조물의 내부에 탄두가 관입 후 폭발할 경우 일반적으로 목표물에 상당한 변위, 파손 및 광범위한 피해를 유발한다. 따라서 이러한 피해효과를 줄이기 위해서는 관입에 저항할 수 있는 지하구조물 방호 설계가 요구된다. 본 연구에서는 응용요소법을 이용한 철근콘크리트 지하구조물의 관입 방호성능 향상을 위한 주요 인자들을 크게 강도(콘크리트 압축강도) 및 밀도(콘크리트 두께, 철근의 피복 층수, 철근의 직경, 철근의 배근간격)로 나누었다. 이를 바탕으로 다양한 조건에서 관통자에 의한 동적응답 시뮬레이션 전산

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
21(3)377-396(2019)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.3.377

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received March 13, 2019
Revised April 26, 2019
Accepted May 2, 2019

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright ⓒ2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

해석 연구를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구 결과는 철근콘크리트 지하구조물의 관입 방호성능 향상을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 관입, 방호성능, 철근콘크리트 지하구조물, AEM, ELS

1. 서 론

철근콘크리트 구조물 중 특히 방호구조물은 견고성이 강조되어야 함으로 구조물의 파괴가 콘크리트의 압축이나 전단에 의한 파괴가 일어나면 안 되며 철근의 항복에 의해서만 파괴가 일어나도록 설계되어야 한다. 또한, 방호 구조물은 공격으로부터 내부 자원과 인원의 안전을 보호하기 위해 설계되어야 하며, 기폭점으로부터 이격거리를 최대화하기 위해 무기의 관입깊이를 최소화하도록 설계되어야 한다. 방호 구조물은 무기의 운동에너지를 흡수하여 정지시킬 수 있는 시간을 확보하기 위해 연성을 가지거나 그 두께가 두껍게 설계되어야 한다(Krauthammer, 2008).

특히 터널과 같은 지하 방호 구조물은 땅속 깊은 심도에서도 구축할 수 있으며 공중 폭격이나 포병 포격에 대한 안정적인 방어 능력을 제공해 주는 것으로 알려져 있다(Seo, 2005). 지하 구조물은 인원 및 장비를 보호할 수 있는 최선의 방호 구조물이지만 출입구와 환기 통로는 가장 취약한 부분이므로 지하 방호 구조물 설계 시 이러한 부분에 대한 방호 대비가 필요하다. 대심도에 건설된 지하 방호 구조물들은 여러 터널 등으로 연결할 경우 방대하고 강력한 방호력을 갖출 수 있다.

지하 구조물을 재래식 무기로부터 방호하기 위해 크게 지붕, 벽체, 바닥면에 대한 방호 계획을 염두 해두어야 한다. 먼저 지하 구조물의 지붕의 경우 침투형 탄두의 관통에 저항하기 위해서 지붕의 상부에 희생 슬래브(sacrifice slab)를 설치하거나 파쇄 방지판 등을 설치하여 보호방안을 강구해야 한다. 지하 구조물의 벽체의 경우 침투형 탄두의 지하접촉 폭발로부터 방호하기 위해 벽체의 두께를 지상 구조물의 최소 2배 이상으로 시공하여 보호하여야 한다. 마지막으로 바닥면의 경우는 침투형 탄두가 J형으로 지반에 관입 후 바닥면 하부에서 폭발하는 경우에 대비하여야 한다. 이때 바닥면의 경우 침투형 탄두가 J형으로 지반에 관입 가능한 최대 거리를 산정하여, 그 부분까지의 바닥면 두께를 일반 구조물의 바닥면 두께보다 최소 2배 이상으로 시공하여야 한다(TM 5-855-1, 1986; Seo, 2005).

지하구조물의 내부에 탄두가 관입 후 폭발할 경우 일반적으로 목표물에 상당한 변위, 파손 및 광범위한 피해를 유발한다. 따라서 이러한 피해효과를 줄이기 위해서는 관입에 저항할 수 있는 지하구조물 방호 설계가 요구된다. 철근콘크리트 재질의 경우 대표적인 취성 재료로써 일반적으로 관통 전 전면탄흔의 경우 발사체의 직경과 큰 차이를 보이지 않으나 관통 후 후면탄흔의 경우 발사체의 직경보다 큰 경향을 보인다.

방호구조물 설계 관련하여 가장 널리 활용되는 美 DOA (Department of Army) TM 5-855-1 보고서에서는 철근콘크리트 구조물 관입에 영향을 주는 표적의 특성으로 강도, 경도, 밀도, 연성, 공극율 등으로 판단하였다. 하지

만 TM 5-855-1에서는 주로 강판 관통 후 잔류속도를 측정한 전산해석 결과는 존재하나 철근콘크리트 관통 후 잔류속도를 측정한 전산해석 결과는 SAND97-2426 보고서에 주로 언급되어있다(Young, 1997). 본 논문에서는 TM 5-855-1 및 SAND97-2426 보고서에서 공통적으로 언급한 관입에 영향을 주는 표적(철근콘크리트 구조물)의 특성 중 크게 강도(콘크리트 압축강도) 및 밀도(콘크리트 두께, 철근의 피복 층수, 철근의 직경, 철근의 배근간격)와 관련된 전산해석 연구를 수행하고 그 함의에 대하여 논하였다.

이러한 철근콘크리트 구조물의 관입현상을 분석하기 위해서는 LS-DYNA나 AUTODYN같은 hydro-code를 이용하는 방법이 일반적이나 모델링 및 해석에 많은 시간과 노력이 필요한 단점이 있으므로 본 연구에서는 비교적 빠르게 해석결과를 도출할 수 있는 응용요소법(Applied Element Method, AEM)을 관통자에 대한 철근콘크리트 구조물의 손상과 관입정도를 예측하는 전산해석 기법으로 활용하였다. 본 연구에서는 AEM을 활용하는 Extreme Loading for Structures (ELS) 소프트웨어(Ver. 6.0, Applied Science International 社)를 활용하여 관통자에 의한 동적응답을 시뮬레이션 하였으며, 구조물의 관통 후 잔류속도를 분석하기 위해 철근콘크리트 구조물 모델들을 제작하여 초기 충돌 속도에 대해 관통 후 잔류속도 결과를 도출하고 상호 비교·분석하였다.

2. 응용요소법

AEM은 동경대학교의 K. Meguro 교수팀이 1990년대 후반부터 AEM관련 이론을 정립하고 발전시켜 왔으며 AEM관련 후속 연구결과는 2000년대 후반까지 이어져 왔다. 2000년대 후반부터 현재까지 여러 대학 및 산업체의 연구진들이 AEM 관련 분야의 연구결과를 발표하였다. AEM은 크게 연쇄 붕괴(progressive failure), 지진을 포함하는 동적 하중(dynamic loading), 발파 하중(blast detonation), 물체 충돌(material impact) 분야 등에서 활발하게 연구 중이다. AEM 기법을 이용한 연쇄 붕괴 해석의 경우 주기적인 하중(cyclic loading), 정적 하중(static loading), 동적 하중(dynamic loading)에 의해 구조물의 연쇄 붕괴 양상을 주로 연구하였으며, AEM 기법을 이용한 동적 하중 해석의 경우 주로 지진하중이 인가될 경우에 구조물의 거동양상을 연구하였다. 또한, AEM을 이용한 발파 하중 해석의 경우 구조물의 외부 및 내부에서 화약이 기폭 하였을 경우 구조물이 받는 피해효과를 분석하는 연구를 주로 진행하였으며, AEM을 이용한 물체 충돌 해석의 경우 주로 저속의 물체가 구조물에 충돌하였을 때 구조물이 받는 피해효과를 분석하는 연구를 진행하였으나 고속의 물체가 구조물에 충돌하는 경우에 관한 연구는 미비한 실정이다. 90년대 후반에서부터 2000년대 까지는 동적 하중, 연쇄 붕괴 분야에서 집중적으로 연구가 이루어졌으며, 2010년대부터는 기존의 동적 하중, 연쇄 붕괴 분야 외에도 발파 하중 및 물체 충돌 분야까지 AEM을 해석에 활용한 사례를 확장시켰다(Meguro and Tagel-Din, 2000, 2001; Ramancharla and Meguro, 2002, 2006, Asprone et al., 2010; Kernicky et al., 2014; Johns and Clubley, 2016; Salem et al., 2016; Khalil et al., 2017; Cismasiu et al., 2017).

특히 AEM을 활용한 물체 충돌 전산해석의 경우 비교적 근래에 연구가 활발하게 이루어지고 있다. Salem et al. (2016)은 3D AEM 이론 모델을 활용하여 2011년 동일본 대지진 때 발생한 쓰나미로 인해 교량(Tsuyagawa

bridge)이 붕괴된 현상을 모사하였으며, 해석결과 교량의 교대(pier)가 붕괴될 때의 쓰나미 유속이 약 6.6 m/s 수준으로 추정하였다. Khalil et al. (2017)은 3D AEM 이론 모델을 활용하여 단일 유정 관측 플랫폼(Single Well Observation Platform, SWOP)을 모델링한 후 선박의 충격(1, 5, 10 knot)을 가정하여 SWOP 구조물의 붕괴양상을 3가지 케이스(3,500 ton급 선박의 정적하중 인가, 3,500 ton급 선박의 동적충격 인가, 플랫폼을 지지하는 파일(pile)들의 급격한 붕괴 시)로 나누어 전산해석을 진행하였다. Cismasiu et al. (2017)은 3D AEM 이론 모델을 활용하여 3가지 종류(compression, tension, mixed model)의 철근콘크리트 전단 벽체(shear wall)들을 모델링한 후 하중-변형률 곡선, 파괴 하중 및 모드, 균열 패턴의 전산해석 결과를 획득한 후 동일 조건의 실험결과와 비교하여 AEM 이론 모델이 철근콘크리트의 파괴 거동 예측에 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

AEM은 구조물의 비선형 동적 해석에 적용가능하며, 균열의 효과, 콘크리트 파쇄, 철근의 항복에 대한 고려가 가능하다는 장점이 있다. 또한, 강체의 움직임과 붕괴 시 구조물 요소들 간의 충돌이 신뢰할만한 정확성을 보여주며 붕괴 진행에 대한 해석을 진행할 때 붕괴 진행과 관련된 선행 정보를 필요로 하지 않고 해석이 가능하다. AEM은 해석의 대상이 되는 구조물을 작은 요소들의 집합체로 모형화하며, 요소들은 요소면 주위에 분포되어 있는 접촉점에서 한 개의 수직 수프링과 두 개의 전단 스프링에 의해 연결된 것으로 가정한다. AEM에서 각각의 요소는 3차원의 물리적인 좌표와 형상을 가지며 서로 분리되거나 충돌할 수 있다. 3D AEM 해석의 경우 주로 입방체 요소들로 구조물을 모형화하며 4점, 5점, 6점의 각추형 또는 각주형으로도 모형화 할 수 있다. 각 요소들은 3개의 병진과 3개의 회전인 6개의 자유도를 가지며 자중은 항상 Z 방향으로 인가된다.

본 연구에서 적용하는 ELS 소프트웨어는 응용요소법을 기반으로 제작되어 주로 극한 하중조건 하에 구조물의 손상정도와 붕괴거동을 예측하는 수치해석 프로그램이다. ELS 프로그램은 요소(element)와 요소 사이의 면은 스프링을 자동으로 생성하여 상호 연결된다. 연결 스프링은 요소 사이의 응력, 변형률, 연결 상태를 나타내며, 요소들의 크기가 변할 때 특정한 변환 요소가 필요 없으며 같은 면을 공유하는 요소들은 면의 일부분만이라도 공유되면 연결 스프링으로 소프트웨어 상에서 인식된다. 요소를 연결하는 스프링은 매트릭스 스프링과 철근 스프링으로 나누며 매트릭스 스프링은 인접한 두 요소의 연결 상태와 주요 구성 재료의 특성을 나타낸다(ASI, 2010).

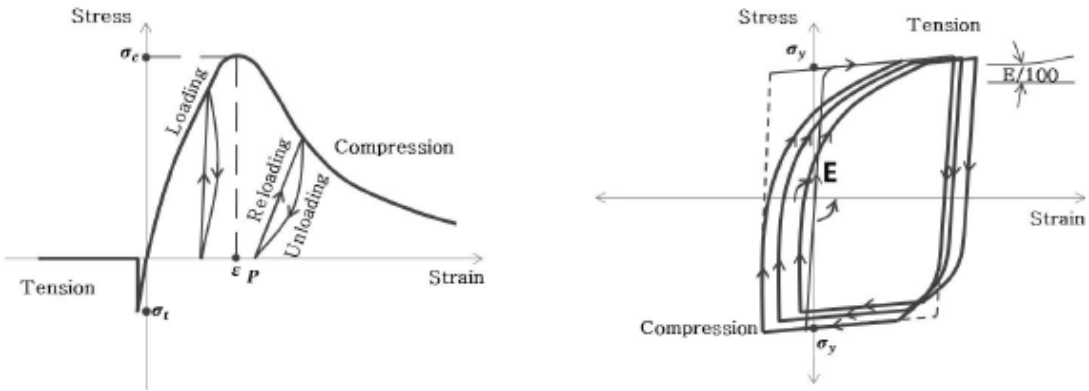
3. 시험 모델링

본 연구에서 사용한 ELS 프로그램은 AEM을 기반으로 만들어진 연쇄붕괴, 지진하중, 폭발하중, 물체충돌관련 비선형 동적 구조 해석 프로그램으로 해석대상 구조물을 작은 요소들의 집합체로 모형화하고, 각각의 요소들은 요소면 주위에 분포되어 있는 접촉점에서 1개의 수직 스프링(normal spring)과 2개의 전단 스프링(shear spring)으로 연결된 것으로 가정하여 사용한다. 각 요소를 연결하는 스프링은 요소 사이의 응력, 변형률 및 연결 상태를 나타내며 각각의 스프링은 매트릭스 형태로 표현된다.

3.1 재료 구성모델 및 모델 형상

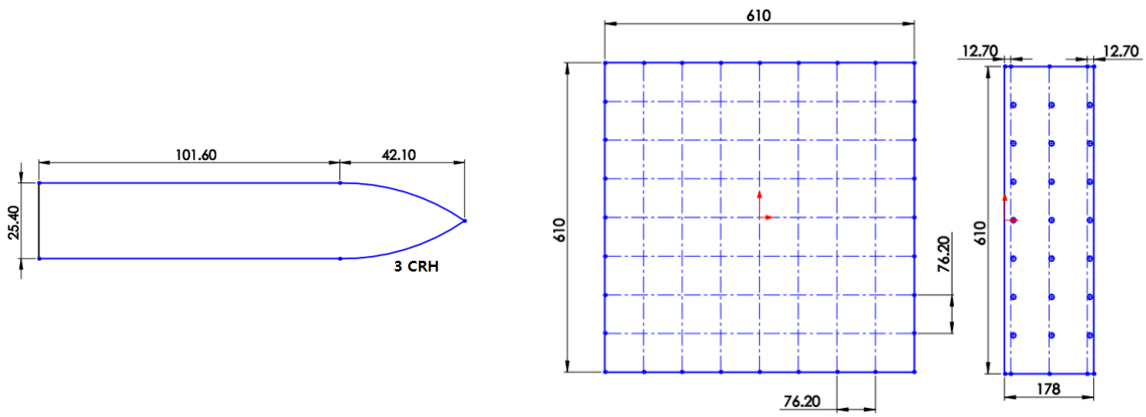
Fig. 1은 ELS 프로그램 상에서 사용되는 콘크리트 및 철근재료의 구성모델의 응력-변형률 분포곡선이다. Fig. 1(a)의 콘크리트 구성모델은 콘크리트 내부 손상, 압축소성 변형률 등을 나타내었으며, Fig. 1(b)의 철근 구성모델은 철근의 물성치, 하중의 재하 상태 및 Bauschinger 효과를 고려하여 계산된다.

본 연구에서는 Hanckak et al. (1992)에서 수행하였던 실제 철근콘크리트 관통실험에서 사용된 모델 형상을 동일하게 구성하였다(Fig. 2). Fig. 2(a)의 관통자(penetrator)의 경우 외형 치수는 직경 25.4 mm, 전체길이 143.7 mm (전방 아치부(ogive nose)의 길이 42.1 mm)이며, 중량은 0.5 kg이다. 관통자의 재질은 T-250 마레이징강(maraging steel)을 사용하였다. Fig. 2(b)의 철근콘크리트 표적의 경우 외형 치수는 610 × 610 × 178 mm (가로 × 세로 × 두께)이며, 철근의 직경은 5.69 mm이고 철근의 배근간격은 76.2 mm으로 배근되었다.



(a) Concrete (Okamura and Maekawa, 1991) (b) Reinforcement (Ristic et al., 1986)

Fig. 1. Axial stress-strain relationship

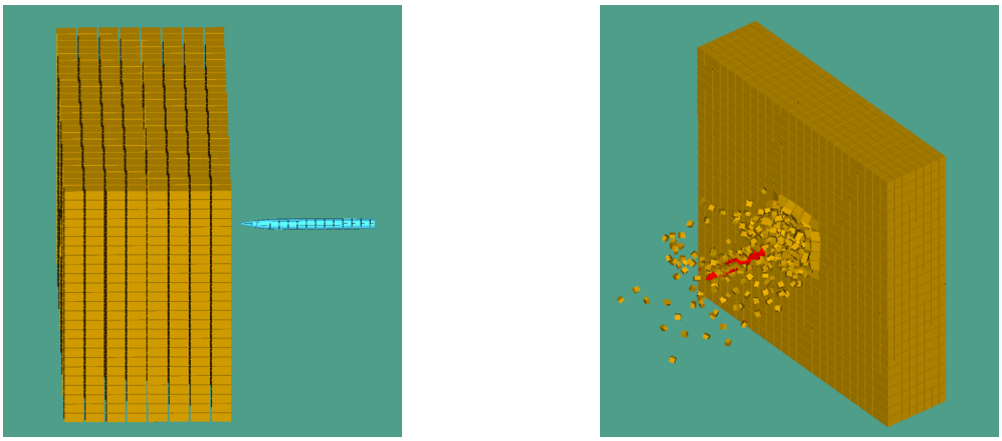


(a) Penetrator (b) Reinforcement concrete target

Fig. 2. Model geometry (Hanchak et al., 1992)

3.2 모델링 해석 신뢰도 검증

ELS 프로그램을 활용하여 철근콘크리트 구조물의 관입 방호성능 해석의 타당성을 확인하기 위해 본 연구에서 사용되는 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 Hanckak et al. (1992)에서 수행하였던 실제 철근콘크리트 관통실험 결과를 활용하여 비교·분석하였다. Fig. 3은 ELS 프로그램을 활용하여 Hanckak et al. (1992)에서 수행하였던 실제 철근콘크리트 관통실험에서 사용된 관통자 및 철근콘크리트 표적 형상과 동일한 수치해석 모델(Fig. 3(a))이며, 관입 방호성능 해석의 예시결과를 도시하였다(Fig. 3(b)). 본 연구에서 철근콘크리트 모델의 경우 각각 RFT 및 Wall로 구성하여 결합하였으며 관통자가 지나가는 부분의 mesh 크기를 다른 부분에 비해 상대적으로 미세하게 설정하여 해석의 정밀도를 향상시켰으며, 관통자는 8-node로 모델을 구성하였다. 해석상에서 관통자가 관통하는 시간은 총 0.1초이며 time step은 10^{-5}초로 설정하였다.



(a) Penetrator and reinforcement concrete target (b) Schematic example of protective performance analysis

Fig. 3. Generation of full model

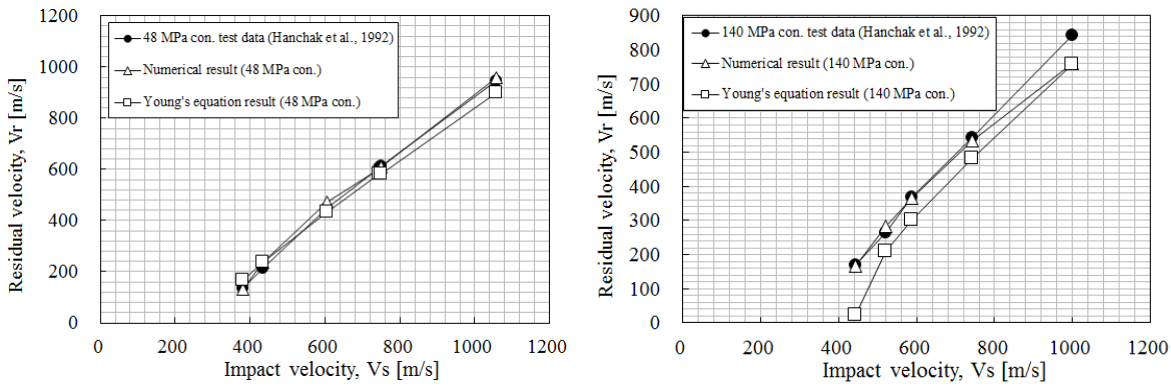
관통자는 48 MPa, 140 MPa 압축강도를 가진 철근콘크리트 표적을 대상으로 300~1,000 m/s의 입사 충돌속도(Vs)로 발사되었으며, Table 1 및 Table 2에 입사속도에 따른 관통자의 잔류속도(Vr) 결과값을 도시하였으며, Table 1 및 Table 2에서 도시된 결과값은 Fig. 4(a) 및 Fig. 4(b)에서 그래프로도 확인할 수 있다. Table 1 및 Fig. 4(a)의 48 MPa의 압축강도를 가진 철근콘크리트 표적관련 해석 신뢰도 검증결과를 볼 때 수치해석 결과는 실험결과와 비교하여 평균적으로 약 4% 정도의 잔류속도 차이를 보여주었으며, 관통 경험식 결과는 실험결과와 비교하여 평균적으로 약 9% 정도의 잔류속도 차이를 보여주었다. 또한 Table 2 및 Fig. 4(b)의 140 MPa의 압축강도를 가진 철근콘크리트 표적관련 해석 신뢰도 검증결과를 볼 때 수치해석 결과는 실험결과와 비교하여 평균적으로 약 4% 정도의 잔류속도 차이를 보여주었으며, 관통 경험식 결과는 실험결과와 비교하여 평균적으로 약 29% 정도의 잔류속도 차이를 보여주었다.

Table 1. Comparison of test data and numerical result (48 MPa reinforcement concrete target)

Impact velocity, Vs [㎧]		381	434	606	746	749	1058
Residual velocity, Vr [㎧]	48 MPa concrete test data (Hanchak et al., 1992)	136	214	449	605	615	947
	Numerical result (48 MPa concrete)	133	238	471	600	610	960
	Young's equation result (48 MPa concrete)	168	238	432	580	583	901

Table 2. Comparison of test data and numerical result (140 MPa reinforcement concrete target)

Impact velocity, Vs [㎧]		443	522	587	743	998	1058
Residual velocity, Vr [㎧]	140 MPa concrete test data (Hanchak et al., 1992)	171	265	368	544	842	947
	Numerical result (140 MPa concrete)	166	283	367	535	760	960
	Young's equation result (140 MPa concrete)	22	211	300	483	757	901



(a) 48 MPa reinforcement concrete target (b) 140 MPa reinforcement concrete target

Fig. 4. Comparison of test data and numerical result

상기 해석 신뢰도 검증결과를 종합해 볼 때 수치해석 결과는 48, 140 MPa 모두 동일하게 실험결과와 비교하여 4% 수준으로 잔류속도 차이를 보여주고 있음을 알 수 있으나, 관통 경험식 결과는 48 MPa 철근콘크리트 해석 신뢰도 검증결과에서 9%, 140 MPa 결과에서 29%로 콘크리트 압축강도의 증가영향을 일부 과대평가하는 경향이 있는 것으로 판단되나 전체 해석 신뢰도에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

4. 시험 해석결과

4.1 콘크리트 압축강도에 따른 영향

콘크리트의 압축강도는 하중의 작용속도 즉 변형률 속도 효과(strain rate effect)에 따라 영향을 받으며 콘크리트의 폭발현상과 같이 높은 변형률 속도를 보이는 경우 콘크리트의 압축강도는 기준강도에서 최소 20% 이상 증가된 강도의 콘크리트를 사용하는 것을 추천하나, 초고강도 콘크리트의 경우 직접 타격 시 취성파괴의 위험이 존재하기 때문에 일반적으로 24~28 MPa 범위의 압축강도를 사용하는 것이 적절한 것으로 알려져 있다. 또한 콘크리트의 강도는 탄성한계를 초과하는 반복하중에 의해서도 콘크리트의 강도가 감소할 수 있다는 점을 방호구조물 설계 시 염두에 두어야 한다(MND, 1998). 이러한 사례들을 바탕으로 본 연구에서는 콘크리트 압축강도가 관입 방호성능에 미치는 영향을 확인하기 위해 일반적인 건축구조물에서 활용되는 20 MPa 범위에서 초고강도 콘크리트 영역에서 활용되는 140 MPa 수준까지 포함하여 모델 해석을 진행하였다.

Fig. 5는 일정 수준 이상의 콘크리트 압축강도(20~140 MPa)를 가진 표적에 300~1,100 m/s의 속도로 충돌한 관통자의 잔류속도 결과이다(콘크리트 두께: 178 mm, 철근 피복층수: 3 layer, 철근 직경: 5.69 mm, 철근 배근간격: 76.2 mm). 이와 관련된 해석 결과와 관련된 상세한 수치는 Table 3에 정리하였다. 모든 충돌 속도 구간에서 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 잔류속도가 낮아지는 현상이 발생하였으며, 콘크리트 압축강도가 20 MPa씩 증가할 때마다 탄체의 잔류속도는 수치해석결과 상에서는 약 29 m/s씩 감소하는 것으로 나타났다(300 m/s 결과 제외). 콘크리트가 철갑탄(AP projectile), 철갑폭탄(AP bomb), 반철갑폭탄(SAP bomb)에 정면으로 타격될 경우 관입량은 일반적으로 콘크리트 압축강도의 제곱근에 반비례하는 것으로 알려져 있다(TM 5-855-1, 1986). 이러한 결과는 Fig. 5에서 콘크리트의 강도가 급격히 증가할 때 잔류속도의 감소폭이 상대적으로 크지 않은 현상을 보여주는 것과 유사한 결과라고 판단된다.

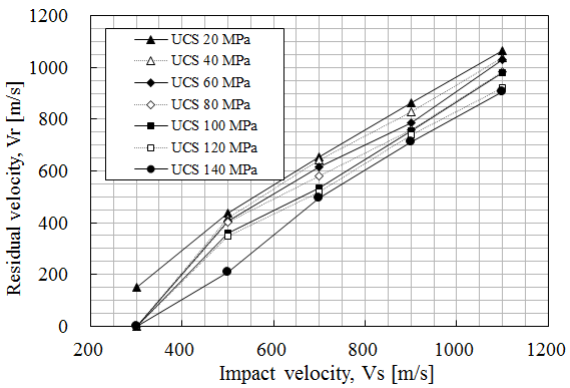


Fig. 5. Uni-axial compressive strength effects on concrete (20~140 MPa)

Table 3. Uni-axial compressive strength effects on concrete (20~140 MPa)

Concrete strength [MPa]	Impact velocity, Vs [㎧]	Residual velocity, Vr [㎧] Vr - numerical result [㎧]
20	300	152
	500	438
	700	654
	900	864
	1,100	1,064
40	300	0
	500	419
	700	642
	900	830
	1,100	1,038
60	300	0
	500	406
	700	615
	900	785
	1,100	1,031
80	300	0
	500	403
	700	581
	900	760
	1,100	983
100	300	0
	500	359
	700	533
	900	756
	1,100	979
120	300	0
	500	348
	700	519
	900	739
	1,100	923
140	300	0
	500	208
	700	494
	900	711
	1,100	908

콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 잔류속도 해석 결과는 20 MPa 콘크리트 영역에서 평균적으로 44 m/s, 40 MPa 콘크리트 영역에서 평균적으로 100 m/s, 60 MPa 콘크리트 영역에서 평균적으로 103 m/s, 80 MPa 콘크리트 영역에서 평균적으로 97 m/s, 100 MPa 콘크리트 영역에서 평균적으로 84 m/s 및 120 MPa 콘크리트 영역에서 평균적으로 49 m/s 잔류속도 값들 간의 편차가 나타나는 것으로 나타났다(300 m/s 결과 제외). 잔류속도 값들 간의 편차는 20~60 MPa 구간까지 증가하다가 60 MPa 구간 이후에 점차 다시 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 충돌 속도가 동일한 구간일 때의 여러 압축강도를 가진 표적의 잔류 속도 값들 간의 편차는 관통자의 충돌 속도가 점차 증가함에 따라 저속(300~500 m/s)보다 고속영역(900~1,100 m/s)에서 잔류속도가 더 많이 줄어든 현상이 나타났다.

결론적으로, 지하구조물의 관입 방호성능을 향상시키기 위해서는 콘크리트의 압축강도를 증가시키는 것이 방호성능을 향상시키는데 일부 도움이 된다는 점을 알 수 있으나, 콘크리트의 압축강도만의 증가가 관통자의 관입 자체를 방지하기 위한 목적으로 활용되기는 다소 힘들 것으로 판단된다.

4.2 콘크리트 두께에 따른 영향

Fig. 6은 일정 수준 이상의 콘크리트 두께(150~450 mm) 및 콘크리트 압축강도(20~140 MPa)를 가진 표적에 300~1,100 m/s의 속도로 충돌한 관통자의 잔류속도 결과이다(철근 피복층수: 3 layer, 철근 직경: 5.69 mm, 철근 배근간격: 76.2 mm). 이와 관련된 해석 결과와 관련된 상세한 수치는 Table 4에 정리하였다.

모든 충돌 속도 구간에서 콘크리트의 두께가 증가할수록 관통자의 잔류속도가 감소하는 것으로 나타났다. 1,100 m/s 구간에서 콘크리트 압축강도 증가에 따른 관통자의 잔류속도 값들 간의 편차는 콘크리트의 두께가 증가할수록 점차 커지는 것으로 나타났는데, 콘크리트 두께가 450 mm일 때 탄체의 잔류속도 감소량이 콘크리트 두께가 150 mm일 때보다 약 5.2배 더 많은 것으로 나타났다.

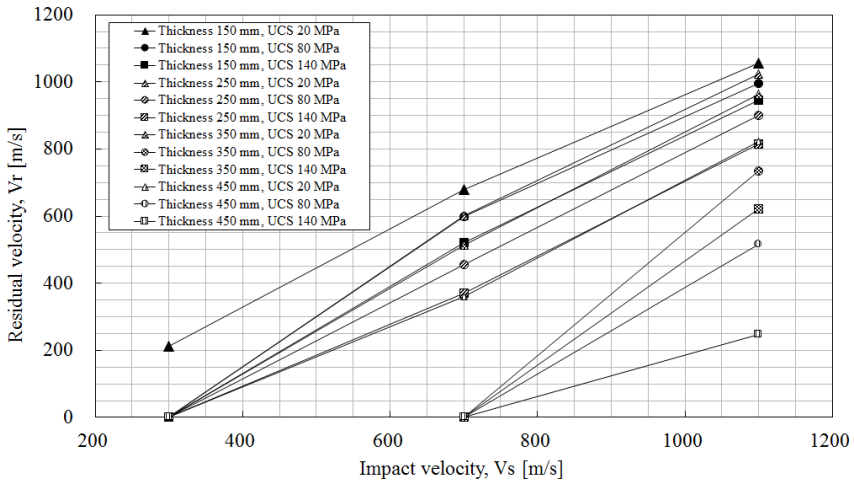


Fig. 6. Thickness effects on concrete (150~450 mm)

Table 4. Thickness effects on concrete (150~450 mm)

Concrete thickness [mm] - UCS [MPa]	Impact velocity, Vs [㎧]	Residual velocity, Vr [㎧]
		Vr - numerical result [㎧]
150 - 20	300	213
150 - 80		0
150 - 140		0
150 - 20	700	679
150 - 80		598
150 - 140		520
150 - 20	1,100	1,056
150 - 80		996
150 - 140		945
250 - 20	300	0
250 - 80		0
250 - 140		0
250 - 20	700	602
250 - 80		456
250 - 140		371
250 - 20	1,100	1,022
250 - 80		899
250 - 140		815
350 - 20	300	0
350 - 80		0
350 - 140		0
350 - 20	700	513
350 - 80		0
350 - 140		0
350 - 20	1,100	962
350 - 80		735
350 - 140		621
450 - 20	300	0
450 - 80		0
450 - 140		0
450 - 20	700	361
450 - 80		0
450 - 140		0
450 - 20	1,100	823
450 - 80		517
450 - 140		246

1,100 m/s 구간에서 콘크리트 두께 증가에 따른 관통자의 잔류속도 감소 영향은 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 점차 증가하는 것으로 나타났다. 해석결과 상에서는 콘크리트의 압축강도가 140 MPa일 때 관통자의 잔류속도 감소폭이 콘크리트 압축강도가 20 MPa일 때보다 약 3.0배 더 큰 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트 압축강도와 콘크리트 두께는 관통자의 잔류속도 감소에 상호 유기적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 1,100 m/s 구간에서 각각의 케이스들의 잔류속도 편차를 비교하면, 콘크리트 압축강도의 증가에 따른 관통자의 잔류속도 감소에 미치는 영향보다 콘크리트 두께 증가로 인한 관통자의 잔류속도 감소에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 해석결과 상에서는 콘크리트 두께의 증가로 인한 영향이 콘크리트 압축강도의 증가로 인한 영향보다 약 1.5배 이상 관통자의 잔류속도를 더 감소시키는 것으로 나타났다.

결론적으로, 지하구조물의 관입 방호성능을 향상시키기 위해서는 콘크리트의 두께 및 콘크리트 강도를 증가시키는 것이 방호성능을 향상시키는데 크게 도움이 된다는 점을 알 수 있으며, 특히 콘크리트의 두께가 관입 방호성능을 유지하는데 가장 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

Fig. 6의 결과를 바탕으로 지하구조물의 관입 방호성능 관점에서 지하구조물 설계 시 관통자의 충돌속도가 300 m/s일 경우 최소 콘크리트의 두께가 150 mm 이상, 콘크리트 압축강도가 20 MPa 이상이 되는 것이 추천된다. 또한, 관통자의 충돌속도가 700 m/s일 경우 최소 콘크리트의 두께가 250 mm 이상, 콘크리트 압축강도가 80 MPa 이상 혹은 콘크리트의 두께가 350 mm 이상, 콘크리트 압축강도가 20 MPa 이상 되는 것이 추천된다. 마지막으로 관통자의 충돌속도가 1,100 m/s일 경우 최소 콘크리트의 두께가 350 mm 이상, 콘크리트 압축강도가 80 MPa 이상 혹은 콘크리트의 두께가 450 mm 이상, 콘크리트 압축강도가 20 MPa 이상 되는 것이 추천된다.

국내 터널 현장에서 시공된 콘크리트 라이닝의 경우 평균적으로 라이닝의 두께는 300 mm 이상이며, 라이닝의 압축강도는 26 MPa 이상으로 집계되었다(Ma and Jang, 2006). 따라서 직경 25.4 mm, 전체길이 143.7 mm정도의 관통자가 지반을 침투한 후 터널 라이닝에 충돌할 경우 약 300 m/s 이내의 충돌속도에는 관입되지 않고 방호성능을 유지할 것으로 추정된다(250 mm - 20 MPa 케이스에 해당).

4.3 철근의 피복 층수에 의한 영향

Fig. 7은 일정 수준 이상의 철근 피복 층수(1~3 layer) 및 콘크리트 압축강도(20~140 MPa)를 가진 표적에 700 m/s의 속도로 충돌한 관통자의 잔류속도 결과이다(콘크리트 두께: 178 mm, 철근 직경: 5.69 mm, 철근 배근간격: 76.2 mm). 이와 관련된 해석 결과와 관련된 상세한 수치는 Table 5에 정리하였다. Fig. 7의 해석결과 상에서 충돌속도가 700 m/s일 때 철근 피복 층수에 따른 평균 잔류속도 차이는 약 35 m/s 정도로 나타났다(20 MPa의 경우 1~3 layer 잔류속도 편차: 32 m/s, 80 MPa의 경우 1~3 layer 잔류속도 편차: 47 m/s, 140 MPa의 경우 1~3 layer 잔류속도 편차: 27 m/s).

또한 Fig. 7의 해석결과 상에서 충돌 속도가 700 m/s일 때 철근의 피복 층수가 1 layer일 때 일축압축강도 증가(20~140 MPa)에 따른 평균 잔류속도 차이는 113 m/s (579~692 m/s)이었으며, 철근의 피복 층수가 2 layer일 때

일축압축강도 증가(20~140 MPa)에 따른 평균 잔류속도 차이는 112 m/s (561~673 m/s)이었으며, 철근의 피복 층수가 3 layer일 때 일축압축강도 증가(20~140 MPa)에 따른 평균 잔류속도 차이는 108 m/s (552~660 m/s)으로 나타났다. ELS 해석결과 상으로 철근의 피복 층수가 증가함에 따라 평균 잔류속도의 차이가 미세하게 줄어드는 것으로 나타났다.

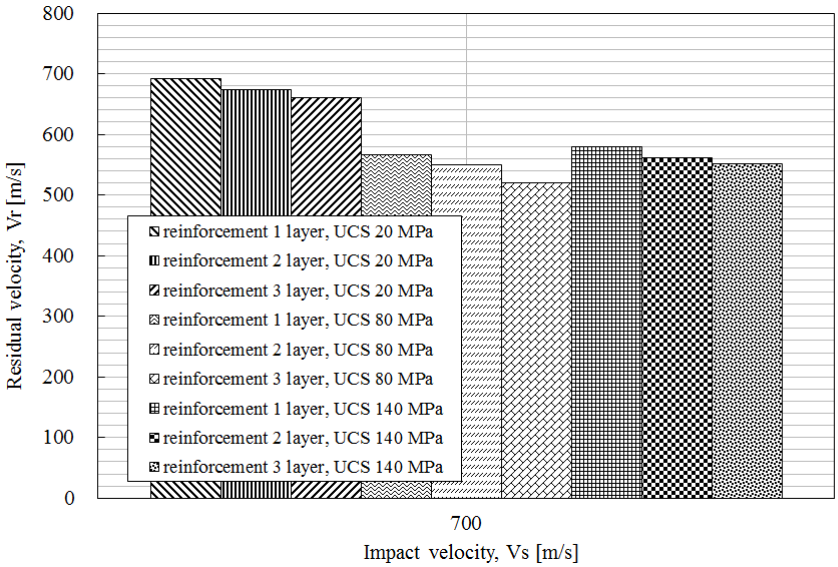


Fig. 7. Layer effects on reinforcement (1~3 layers, Vs = 700 m/s)

Table 5. Layer effects on reinforcement (1~3 layers)

Number of steel layer - UCS [MPa]	Impact velocity, Vs [㎧]	Residual velocity, Vr [㎧] Vr - numerical result [㎧]
1 - 20	700	692
2 - 20		673
3 - 20		660
1 - 80		567
2 - 80		549
3 - 80		520
1 - 140		579
2 - 140		561
3 - 140		552
1 - 20	1,100	1,052
2 - 20		1,033
3 - 20		1,016
1 - 20	1,500	1,465
2 - 20		1,444
3 - 20		1,419

Fig. 8은 해석결과 상에서 일축압축강도가 20 MPa일 때 700, 1,100, 1,500 m/s 충돌속도에서의 철근의 피복층수에 따른 영향을 비교한 결과이다(콘크리트 두께: 178 mm, 철근 직경: 5.69 mm, 철근 배근간격: 76.2 mm). Fig. 8의 결과에서 700 m/s 충돌속도에서 철근의 피복층수에 따른 잔류속도 차이는 32 m/s (660~692 m/s)이고, 1,100 m/s 충돌속도에서 철근의 피복층수에 따른 잔류속도 차이는 36 m/s (1,016~1,052 m/s)였으며, 1,500 m/s 충돌속도에서 철근의 피복층수에 따른 잔류속도 차이는 46 m/s (1,419~1,465 m/s)로 나타났다. 해석결과상에서 충돌속도가 증가함에 따라 잔류속도 차이가 미세하게 증가하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 이는 초기 충돌속도가 증가함에 따라 잔류속도 편차의 절대값이 점차 커지는 것으로 판단된다.

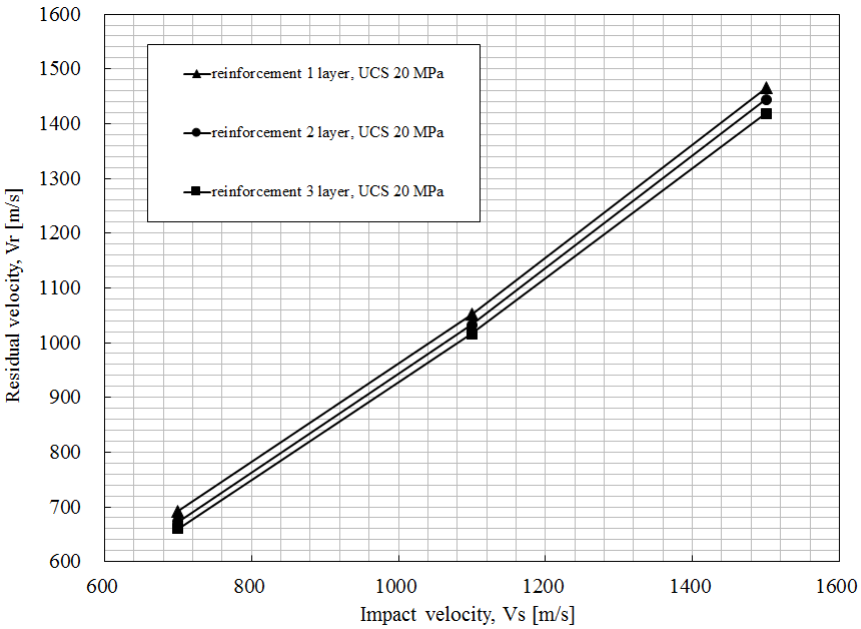


Fig. 8. Layer effects on reinforcement (1~3 layers, UCS = 20 MPa)

상기 해석 결과들을 종합할 때 콘크리트의 일축압축강도 증가로 인한 잔류속도에 미치는 영향이 철근의 피복층수 증가로 인한 잔류속도에 미치는 영향보다 약 3배 더 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 철근의 피복 층수의 증가는 지하구조물의 관입 방호성능 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

4.4 철근의 직경에 의한 영향

Fig. 9는 콘크리트의 일축압축강도가 20 MPa일 때 철근의 직경의 증가(D10~D35)에 따른 영향을 700~1,500 m/s의 충돌속도에서 해석한 관통자의 잔류속도 결과이다(콘크리트 두께: 178 mm, 철근 배근간격: 76.2 mm). 이와 관련된 해석 결과와 관련된 상세한 수치는 Table 6에 정리하였다.

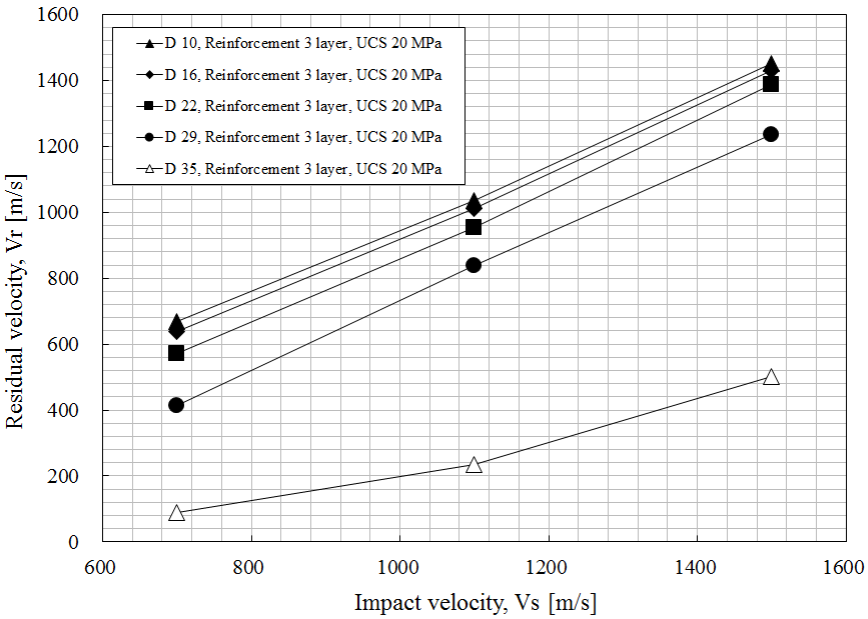


Fig. 9. Size effects on reinforcement (D10~D35)

Table 6. Size effects on reinforcement (D10~D35)

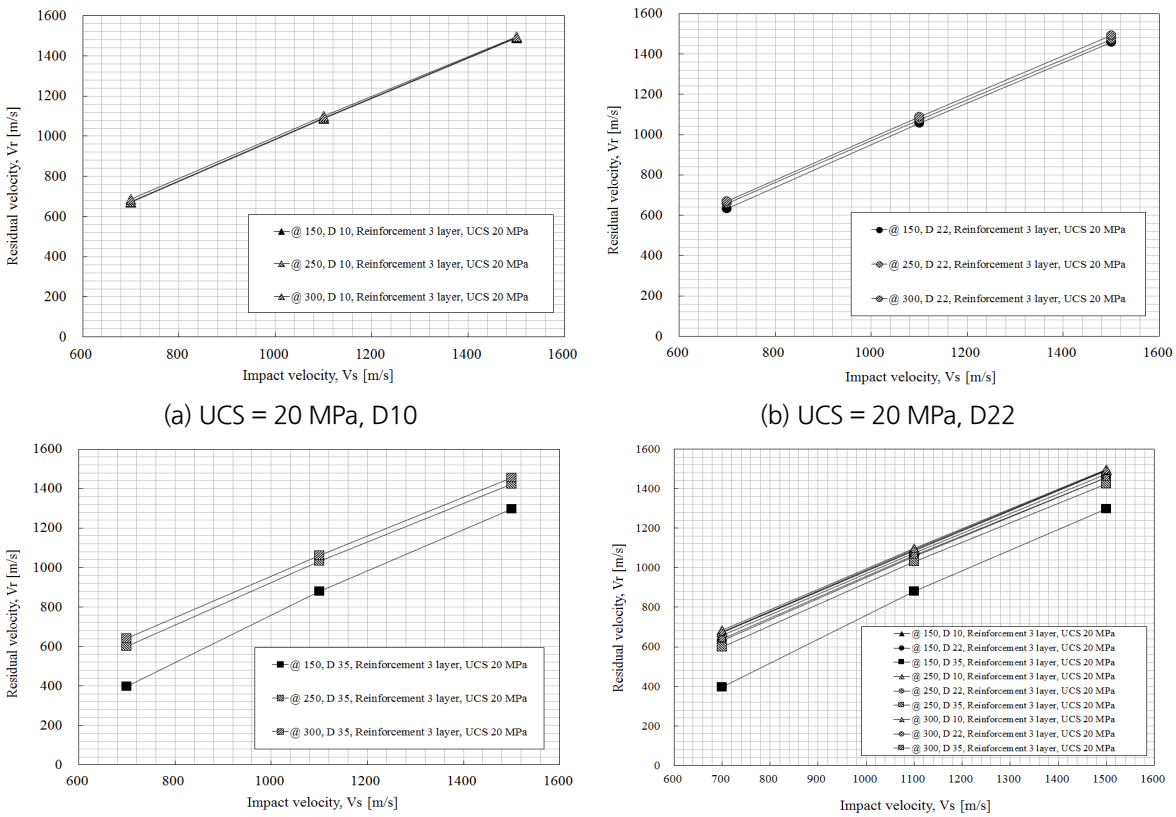
Designation - Nominal dimension [mm] - Volume percent [%]	Impact velocity, Vs [㎧]	Residual velocity, Vr [㎧]
		Vr - numerical result [㎧]
D10 - 9.5 - 0.69	700	668
D16 - 15.9 - 1.92		639
D22 - 22.2 - 3.74		572
D29 - 28.6 - 6.21		415
D35 - 34.9 - 9.24		89
D10 - 9.5 - 0.69	1,100	1,035
D16 - 15.9 - 1.92		1,012
D22 - 22.2 - 3.74		954
D29 - 28.6 - 6.21		839
D35 - 34.9 - 9.24		235
D10 - 9.5 - 0.69	1,500	1,452
D16 - 15.9 - 1.92		1,429
D22 - 22.2 - 3.74		1,388
D29 - 28.6 - 6.21		1,235
D35 - 34.9 - 9.24		501

Fig. 9의 해석결과상에서 모든 충돌속도 구간에서 철근의 직경이 증가함에 따라 잔류속도가 감소하는 결과를 확인할 수 있다. 충돌속도 700 m/s일 때 D35와 D10 철근을 사용할 때 잔류속도 차이는 약 579 m/s (89~668 m/s) 수준 이였으며, 충돌속도 1,100 m/s일 때 D35와 D10 철근을 사용할 때 잔류속도 차이는 약 800 m/s (235~1,035 m/s) 수준 이였으며, 충돌속도 1,500 m/s일 때 D35와 D10 철근을 사용할 때 잔류속도 차이는 약 951 m/s (501~1,452 m/s) 수준 이였다.

상기 해석 결과들을 종합할 때 철근의 직경의 증가는 지하구조물의 관입 방호성능 향상에 일정 수준 이상의 역할을 수행하는 것으로 판단되며, 효율적인 방호성능을 획득하기 위해서는 직경 35 mm 이상의 이형철근을 활용하는 것이 추천된다.

4.5 철근의 배근간격에 의한 영향

Fig. 10(a)~10(d)의 결과들은 콘크리트의 일축압축강도가 20 MPa일 때 철근의 배근간격의 증가(@150, @250, @300)에 따른 영향을 700, 1,100, 1,500 m/s의 충돌속도에서 해석한 관통자의 잔류속도 결과이다(콘크리트 두께:



(a) UCS = 20 MPa, D10

(b) UCS = 20 MPa, D22

(c) UCS = 20 MPa, D35

(d) UCS = 20 MPa, D10~D35

Fig. 10. Spacing effects on reinforcement (@150~@300)

178 mm). 이와 관련된 해석 결과와 관련된 상세한 수치는 Table 7에 정리하였다. 철근의 배근간격은 일반 건축구조물에서 설계 시 범용적으로 사용되는 철근의 배근간격 범위를 고려하여 산정하였다.

Table 7. Spacing effects on reinforcement (@150~@300)

Spacing [mm] - Designation	Impact velocity, Vs [㎧]	Residual velocity, Vr [㎧]
		Vr - numerical result [㎧]
@150 - D10	700	671
@250 - D10		674
@300 - D10		685
@150 - D22		632
@250 - D22		657
@300 - D22		671
@150 - D35		397
@250 - D35		599
@300 - D35		641
@150 - D10	1,100	1,087
@250 - D10		1,092
@300 - D10		1,099
@150 - D22		1,057
@250 - D22		1,073
@300 - D22		1,087
@150 - D35		880
@250 - D35		1,031
@300 - D35		1,063
@150 - D10	1,500	1,491
@250 - D10		1,493
@300 - D10		1,497
@150 - D22		1,457
@250 - D22		1,472
@300 - D22		1,491
@150 - D35		1,297
@250 - D35		1,423
@300 - D35		1,456

Fig. 10(a), Fig. 10(b) 및 Fig. 10(c)는 콘크리트의 일축압축강도가 20 MPa일 때 각각 D10, D22, D35 철근을 사용할 때 철근의 배근간격의 증가(@150, @250, @300)에 따른 영향을 700, 1,100, 1,500 m/s의 충돌속도에서의 해석결과이다. Fig. 10(a)의 철근 직경 D10일 때 충돌속도가 증가함에 따라 철근의 배근간격(@150~@300)에

따른 잔류속도의 차이는 14 m/s (700 m/s 구간, 671~685 m/s), 12 m/s (1,100 m/s 구간, 1,087~1,099 m/s) 및 6 m/s (1,500 m/s 구간, 1,491~1,497 m/s)이며, Fig. 10(b)의 철근 직경 D22일 때 충돌속도가 증가함에 따라 철근의 배근간격(@150~@300)에 따른 잔류속도의 차이는 39 m/s (700 m/s 구간, 632~671 m/s), 30 m/s (1,100 m/s 구간, 1,057~1,087 m/s) 및 34 m/s (1,500 m/s 구간, 1,457~1,491 m/s)이며, Fig. 10(c)의 철근 직경 D35일 때 충돌속도가 증가함에 따라 철근의 배근간격(@150~@300)에 따른 잔류속도의 차이는 244 m/s (700 m/s 구간, 397~641 m/s), 183 m/s (1,100 m/s 구간, 880~1,063 m/s) 및 159 m/s (1,500 m/s 구간, 1,297~1,456 m/s)이다.

Fig. 10(a) 및 Fig. 10(b)의 결과에서 철근직경 D10, D22에서는 철근의 배근간격으로 인한 잔류속도의 차이가 크지 않는 것으로 보이나, 철근직경 D35의 경우에는 철근의 배근간격에 따라 일정 수준 이상으로 관통자의 잔류속도 편차가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Fig. 10(d)의 D10, D22, D35 철근의 결과를 모두 종합하여 그래프로 나타낼 때 시각적으로 분명하게 인식할 수 있다.

상기 해석 결과들을 종합할 때 철근의 배근간격의 증가는 지하구조물의 관입 방호성능 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되며, 철근 직경의 증가가 방호성능 향상에 더 큰 도움을 줄 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 AEM을 이용한 철근콘크리트 지하구조물의 관입 방호성능 향상을 위한 주요 인자들을 크게 강도(콘크리트 압축강도) 및 밀도(콘크리트 두께, 철근의 피복 층수, 철근의 직경, 철근의 배근간격)로 나누어 다양한 조건에서 전산해석 연구를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 주요 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 콘크리트의 압축강도는 지하구조물의 관입 방호성능을 향상시키는데 일부 도움이 되는 것으로 나타났다. 하지만 콘크리트 압축강도만의 증가로 지하구조물의 관입 방호성능을 유지하기 힘들 것으로 판단된다.
2. 콘크리트 두께의 증가로 인한 영향이 콘크리트 압축강도의 증가로 인한 영향보다 약 1.5배 이상 관통자의 잔류속도를 더 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 두께가 지하구조물의 관입 방호성능을 향상시키는데 가장 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.
3. 국내에서 시공된 일반적인 터널 현장에서 직경 25.4 mm, 전체길이 143.7 mm정도의 관통자가 지반을 침투하여 터널 라이닝에 충돌할 경우 약 300 m/s 이내의 충돌속도까지는 관입되지 않고 방호성능을 유지할 것으로 추정된다.
4. 콘크리트의 일축압축강도 증가로 인한 잔류속도에 미치는 영향이 철근의 피복 층수 증가로 인한 잔류속도에 미치는 영향보다 약 3배 더 큰 것으로 나타났다. 결과적으로 철근의 피복 층수의 증가는 지하구조물의 관입 방호성능 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.
5. 철근의 직경의 증가는 지하구조물의 관입 방호성능 향상에 일정 수준 이상의 역할을 수행하는 것으로 판단되며, 효율적인 방호성능을 획득하기 위해서는 직경 35 mm 이상의 이형철근을 활용하는 것이 추천된다.

6. 철근의 배근간격의 증가는 지하구조물의 관입 방호성능 향상에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단되며, 철근 직경의 증가가 방호성능 향상에 더 큰 도움을 줄 수 있는 것으로 나타났다.
7. 본 연구에서는 제한된 크기의 관통자 및 표적을 활용하여 전산해석을 진행한 후 결과를 도출하여 관통자 및 표적의 기하학적 변수, 형상, 밀도와 같은 여러 변수들을 고려하지 못했다. 본 연구에서 고려하지 못한 상기 여러 변수들이 지하구조물 관입 방호성능에 미치는 영향은 추후 추가적인 연구를 통해 정량화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. ASI (2010), Extreme loading for structures theoretical manual, Applied Science International, pp. 6-27.
2. Asprone, D., Nanni, A., Salem, H., Tagel-Din, H. (2010). “Applied element method analysis of porous GFRP barrier subjected to blast”, Advances in Structural Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 153-169.
3. Cismasiu, C., Ramos, A.P., Moldovan, I.D., Ferreira, D.F., Filho, J.B. (2017). “Applied element method simulation of experimental failure modes in RC shear walls”, Computers and Concrete, Vol. 19, No. 4, pp. 365-374.
4. Hanchak, S.J., Forrestal, M.J., Young, E.R., Ehrgott, J.Q. (1992). “Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) unconfined compressive strengths”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 1-7.
5. Johns, R.V., Clubley, S.K. (2016). “The influence of structural arrangement on long-duration blast response of annealed glazing”, International Journal of Solids and Structures, Vol. 97-98, pp. 370-388.
6. Kernicky, T.P., Whelan, M.J., Weggel, D.C., Rice, C.D. (2014). “Structural identification and damage characterization of a masonry infill wall in a full-scale building subjected to internal blast load”, Journal of Structural Engineering, Vol. 141, No. 1, D4014013-1-D4014013-13.
7. Khalil, A., Helmy, H., Tageldin, H., Salem, H. (2017). “Ship impact and nonlinear dynamic collapse analysis of a single well observation platform”, In Structures Congress 2017 ASCE, pp. 668-680.
8. Krauthammer, T. (2008), Modern protective structures, CRC Press, pp. 24-38.
9. Ma, S.J., Jang, P.S. (2006), “An investigation into the actual condition of cast in place concrete lining in domestic tunnel”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 54, No. 12, pp. 68-79.
10. Meguro, K., Tagel-Din, H. (2000). “Applied element method for structural analysis: Theory and application for linear materials”, Structural Engineering/Earthquake Engineering of JSCE, Vol. 17, No. 1, pp. 21-35.
11. Meguro, K., Tagel-Din, H. (2001). “Applied element simulation of RC structures under cyclic loading”, Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 11, pp. 1295-1305.
12. MND (1998), Design criteria for protective structures, Ministry of National Defense.
13. Okamura, H., Maekawa K. (1991). Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete, Gihodo Co. Ltd, Tokyo.
14. Ramancharla, P.K., Meguro, K. (2002). “Non-linear static modeling of dip-slip faults for studying ground surface deformation using applied element method”, Structural Engineering/Earthquake Engineering of

JSCE, Vol. 19, No. 2, pp. 169-178.
15. Ramancharla, P.K., Meguro, K. (2006). “3D Numerical modelling of faults for study of ground surface deformation using applied element method”, Current Science, Vol. 91, No. 8, pp. 1026-1037.
16. Ristic, D., Yamada, Y., Iemura, H. (1986), Stress-strain based modeling of hysteretic structures under earthquake induced bending and varying axial loads, Research Report No. 86-ST-01, School of Civil Engineering, Kyoto University.
17. Salem, H., Mohssen, S., Nishikiori, Y., Hosoda, A. (2016). “Numerical collapse analysis of Tsuyagawa bridge damaged by Tohoku Tsunami”, Journal of Performance of Constructed Facilities, Vol. 30, No. 6, pp. 04016065-1-04016065-12.
18. Seo, G.S. (2005), Protective Engineering, Chung Moon Gak, Paju, pp. 320-334.
19. TM 5-855-1 (1986), Fundamentals of protective design for conventional weapons, Department of Army.
20. Young, C.W. (1997), Penetration equations, SAND97-2426, Sandia National Laboratories.