

# 발파 진동으로 인한 지표면 진동 계측 범위 산정에 대한 연구

## Prediction for Measurement Range of Vibration due to Blasting of Underground Tunneling

공 석 민 <sup>1</sup>	Kong, Suk-Min	변 요 셉 <sup>2</sup>	Byun, Yoseph
최 상 일 <sup>3</sup>	Choi, Sang-Il	김 정 흠 <sup>4</sup>	Kim, Jeong-Heum
김 창 용 <sup>5</sup>	Kim, Chang-Yong	이 성 원 <sup>6</sup>	Lee, Seong-Won

### Abstract

Vibrations were measured at the surface of a GTX-A site to assess the impact of blasting on underground tunneling. A numerical analysis was conducted using the same ground and blast conditions as those at the site, accompanied by a comparative analysis of other GTX-A sites. This analysis determined the maximum vibration velocity at regular intervals directly above the blasting point at each site. The results were compared with domestic and international vibration standards to establish the vibration measurement range. The specified vibration measurement locations in domestic regulations—"measuring from the closest part of the structure's foundation to the blasting source, and if conditions make it impossible, measuring from the nearest surface to it"—were evaluated. Furthermore, this study underscores the significance of considering the tunnel drilling depth and soil conditions when selecting a vibration measurement location.

### 요 지

지하터널 굴착 시 발파로 인한 진동의 영향이 지표면에 미치는 영향을 분석하기 위해 GTX-A 굴착현장 상부에서 진동을 측정하였다. 또한 해당 현장과 동일한 지반조건 및 발파조건으로 역해석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 다른 GTX-A 노선 현장들에 대해서 수치해석을 실시하여 비교·분석하였다. 수치해석을 통해 각 현장의 발파지점 직상부로부터 일정 간격으로 최대 진동속도를 도출하였으며, 결과 값을 국내·외 진동 허용기준과 비교하여 진동 계측의 영향 범위를 산정하였다. 이를 통해 국내 규정에서 “발파원으로부터 가장 근접한 구조물 기초 부위에서 측정하고 여건상 불가능한 경우 이에 근접한 지표에서 측정”으로 명시되어 있는 지반진동 측정 위치에 대해 보다 명확한 진동 계측 위치를 산정하였다.

**Keywords :** Blast vibration, Blasting, Measurement locations, Numerical analysis, Tunneling

- 1 정회원, 한국건설기술연구원 박사후연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Geotechnical Engr. Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)
- 2 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engr. Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)
- 3 비회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engr. Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)
- 4 비회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Research Specialist, Dept. of Geotechnical Engr. Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)
- 5 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engr. Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology)
- 6 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engr. Research, Korea Institute of Civil Engr. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0226, Fax: +82-31-910-0211, [swlee@kict.re.kr](mailto:swlee@kict.re.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2024 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

지하 공간의 활용은 도시화로 인한 도시 중심지 인구 증가 및 지상 공간 포화 문제를 해결하기 위한 대표적인 방안이다. 효율적인 지하 공간 개발을 위해 굴착 방법 및 주변 지반, 구조물에 미치는 영향에 대한 문제는 지속적으로 연구되어왔고, 이러한 연구는 원활한 교통 네트워크를 제공하는 것부터 중요한 유틸리티 인프라를 구축하고 안전한 지하 시설을 확보하는 것까지 다양하게 활용되었다. 대표적인 굴착 방법으로는 화약을 이용한 발파 굴착과 TBM(Tunnel Boring Machines)과 같은 기계를 이용한 굴착 방법이 있다. TBM을 이용한 기계식 굴착은 초기 투자 및 유지 관리 비용의 증가, 터널 형상 및 직경, 지반 조건에 대한 제한 등의 단점을 가지고 있어 국내에서는 화약 발파를 이용한 굴착 공법이 주로 사용되고 있다. 하지만 발파 공법은 안전 위험, 환경오염, 소음과 진동 발생 등의 문제점을 가지고 있어 보다 안전하고 친환경적인 굴착을 위한 방법, 소음 및 진동 감소를 위한 화약 대체물질 개발, 폭발 방법 개선, 저감 장치 개발, 예측을 통한 소음 및 진동 저감 방안 마련 연구 등이 지속적으로 발표되어 왔다.

발파란 연소에 의해 순간적으로 많은 양의 열과 가스를 방출하는 화약을 사용하여 암석을 깨뜨리는 것을 의미한다. 이러한 화약 발파를 이용한 굴착은 폭발 시 발생하는 충격압을 통해 굴착면의 암석을 제거하는 방식이다. 폭원으로부터 3 차원으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감쇠되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 탄성파의 형태로 암반 중으로 전파되어 가면서 지반의 진동을 발생시키는데 이를 발파진동(blast vibration)이라 한다(Jeon et al., 2007). 발파 진동의 크기와 전파에 영향을 미치는 대표적인 요소는 화약종류 및 발파 방법, 장약량, 전달거리, 매질의 밀도, 발파원의 폭굉파 속도 등이 있다.

Jung et al.(2011)은 진동전파 경로차단, 화약 조합에 의한 진동 감소 방법 등을 소개하였고, 화약 종류에 따라 실제 터널 현장에서 모의시험발파를 실시하여 발파진동을 측정하였으며, 각각의 발파진동에 대한 전파특성을 분석하였다. 또한, 유한차분기반의 수치해석 프로그램을 이용하여 실제 현장의 화약 발파에 대해 해석하고 라인드릴링과 프리스플리팅의 수치해석 결과와 비교·분석 하여 진동저감 효과를 정량화하였다. Ko(2023)은 폭발 충격파와 완화에 대한 충격완화물질로 전단농화

유체를 사용하여 폭발실험을 수행하였으며, 이를 통해 충격파와 완화 효과를 확인하였다. 또한 추가적인 수치해석을 통해 충격완화물질의 최소 필요 두께를 계산하였고 최적 M/C 비율을 산정하여 65%의 충격압 상쇄 효과가 발생함을 예측하였다. 앞선 연구와 같이 발파 방법이나 화약 조합을 비교·분석하여 발파진동의 감소효과를 예측하는 연구는 지속적으로 발표되고 있으며, 본 연구에서는 이와 달리 동일한 발파방법, 장약량에서 발파되는 암반의 영향(전달거리, 매질의 밀도 등)에 초점을 맞춰 연구를 수행하였다. 최근에는 현장 시험발파 자료를 수집한 후 AI를 활용하여 화약의 종류, 심발공법, 암반의 종류 및 암반등급에 따른 발파진동계수를 예측하는 등 발파진동 저감을 위한 다양한 연구가 수행되고 있다(You et al., 2023).

발파로 인한 진동은 구조물 손상, 환경, 안전 및 인체에 영향을 미칠 수 있으므로 국내·외 관련 기관은 발파진동에 대한 허용 기준치를 정하여 관리하고 있다. Table 1은 진동에 대한 국내·외의 기준을 보여주고 있다(MOLIT, 2002; MOLIT, 2016). 영국의 경우 인구가 조밀한 지역에서의 발파는 1.0cm/sec 이하로 규제하고 있으며, 지진에 대해 민감한 일본의 경우 0.5cm/sec 이상 진동에 대해 구조물에 특별히 약한 부분에 한해서 미세한 피해가 발생한다고 규정하고 있다. 반면, 국내에서는 진동에 예민한 구조물 또는 문화재가 있는 경우, 0.2~0.3m/sec의 범위에서 관리가 필요한 것으로 규정하고있어, 국외의 기준에 비해 가장 엄격하게 발파진동의 영향을 관리하고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 국내 기준이 국외 기준과 비교하여도 엄격하게 발파진동에 대해 관리하고 있음을 알 수 있다. Table 2는 진동 정도에 따라 인체 감지 및 건물에 미치는 영향을 설명하고 있다. 건물은 1.0cm/sec 이상의 진동에서 손상을 입으나, 인체는 그 이하의 수치에서도 진동을 감지할 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 발파로 인한 미소한 진동이 건물에는 영향을 미치지 않을지라도 사람은 진동을 느끼고 이로인해 영향을 받을 수 있음을 알 수 있다. 그렇기 때문에 발파를 시행하는 업체 또한 자체적인 엄격한 기준을 마련하여 진동으로 인한 영향을 최소화하기 위해 노력하고 있다.

Moon and Shin(2008)은 서울시와 부산시의 지하철터널 안전영역 기준에 대해 조사하고 기준을 토대로 터널구조물의 허용 진동속도를 가정하여 발파진동에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석의 결과는 기존 기준과 비교되었으며, 이를 통해 새로운 수직·수평방향 필

Table 1. Domestic and international blasting vibration standards (MOLIT, 2002; MOLIT, 2016)

Classification	Building Type	Permissible Vibration (cm/sec)
Korea	Vibration-sensitive structures and cultural heritage	0.2 ~ 0.3
	Structures with masonry infill walls and timber ceilings (traditional houses and low-rise general houses)	1.0
	Masonry buildings with underground foundations and concrete slabs (row houses)	2.0
	Medium and small buildings with reinforced concrete framework and slabs (low-rise apartments)	3.0
	Large buildings with reinforced concrete, reinforced framework, and slabs (high-rise apartments)	5.0
United Kingdom	Tunnel blasting in densely populated areas	1.0
	Tunnel blasting in areas with low population density	2.5
	Open-pit blasting at a frequency of 12 Hz or less	1.2
	Other	0.5
Switzerland	Historical relics or sensitive structures at 10 to 60 Hz	0.762
	Historical relics or sensitive structures at 60 to 90 Hz	1.27
	No damage caused	0.2
Japan	Vibration can be detected, but no structural damage occurs	0.2 ~ 0.5
	Microscopic damage occurs only in areas where the structure is particularly vulnerable	0.5 ~ 1.0

Table 2. The building damage and human health according to the blasting vibrations (MOLIT, 2002)

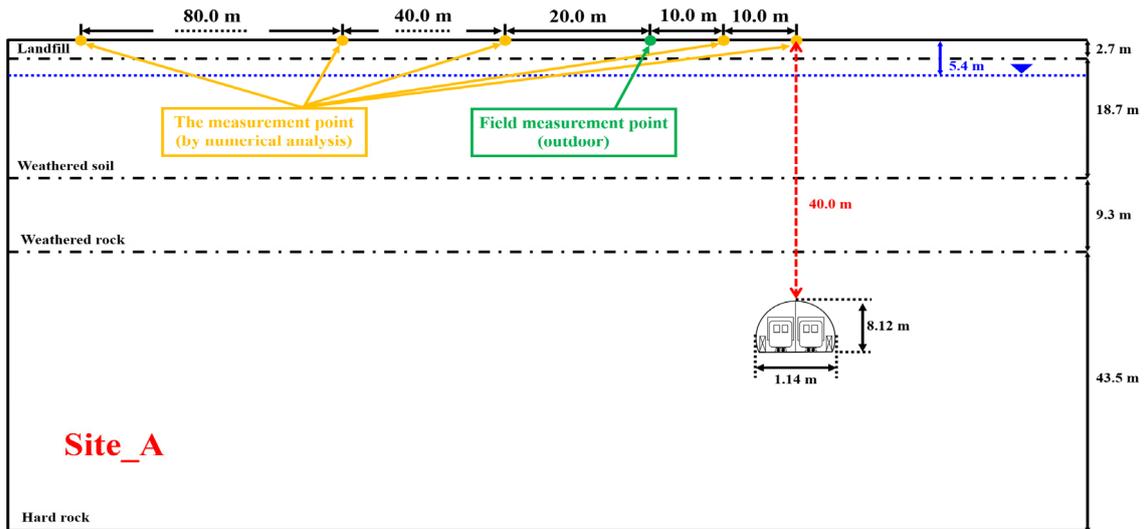
The vibrations (cm/sec)	Effects on buildings and human health
over 50.0	Major damage to the building
10.0 ~ 50.0	Cracks appear in the building
5.0 ~ 10.0	Minor damage to the building
1.0 ~ 5.0	Very minor damage to the building (Feeling about a building collapsing)
0.2 ~ 1.0	Feeling significant vibrations
0.05 ~ 0.2	Many people feel the vibration
0.01 ~ 0.05	Sensitive person feels vibration
less than 0.01	Cannot feel the vibration

요 이격거리를 제시하였다. Son et al.(2014)은 국내·외 발파진동 허용기준에 대해 조사하고, 국내에 적용되는 발파진동 허용기준의 문제점 분석 및 대안을 제시하였다. 이를 통해 구조형식, 재료특성, 진동주파수, 지반조건, 측정 위치, 진동속도 성분 등 다양한 사회, 환경적 요인을 토대로 발파진동 허용기준이 제시되는 국외 기준과는 달리 국내기준은 보다 종합적이고 체계적이지 못함을 연구하였다. Kong et al.(2022)는 실제 현장에서 발파진동을 계측하였으며, 수치해석을 이용하여 터널 심도에 따른 발파진동이 지표면에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 이를 통해 저심도, 중심도에 비해 대심도 현장에서의 발파가 지표면에 미치는 진동 영향이 크게 감소함을 예측하였다. 이처럼 발파진동은 직접적으로 인체와 구조물에 영향을 미칠 수 있기에 기준 및 규정에

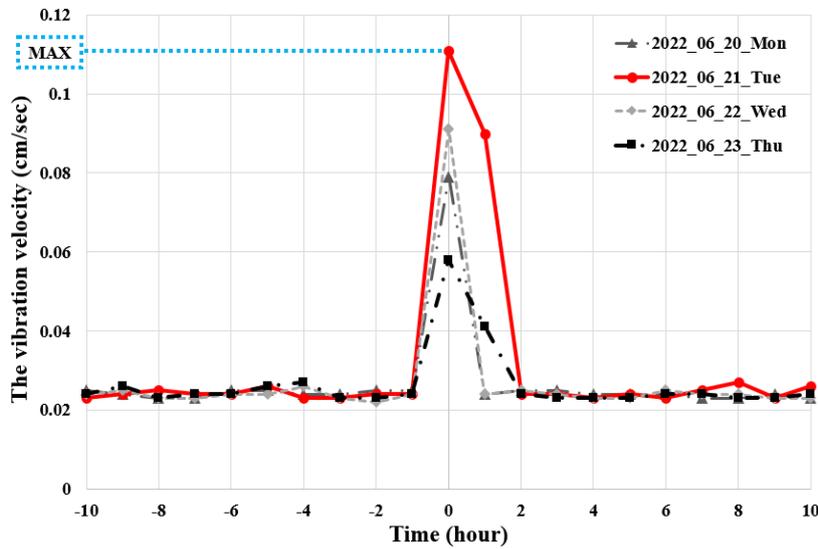
대한 연구는 매우 중요하다. 본 연구는 GTA-A 노선 공사 시 현장에서 계측한 발파 진동 데이터를 바탕으로 유한차분기반 역해석을 실시하였다. 현장 계측 데이터와 역해석 결과를 비교하여 유사한 발파진동 결과를 확인하였으며, 동일한 발파조건으로 다른 3곳의 GTA-A 현장에 대해 추가적으로 수치해석을 실시하였다. 각 현장은 site A, B, C, D로 구분하였으며 각 현장은 대심도(40.0m) 굴착과 중심도(10.0m)로 나누어 총 8가지 case로 해석을 수행하였다. 각 현장의 데이터는 국내·외 기준과 비교·분석하였으며, “대상 시설물에 대한 지반진동은 발파원으로부터 가장 근접한 구조물 기초 부위에서 측정하고 여건상 이것이 불가능한 경우에는 이에 근접한 지표에서 측정할 수 있다(MOLIT, 2016).”라고 규정되어 있는 현 시방기준에 대해 “근접한 지표”의 범위를 보다 정량적으로 제시하였다.

## 2. 지하 터널 발파 진동에 대한 현장 계측

GTX-A 노선 굴착 공사가 진행중인 현장 지표면에 계측기를 설치하여 지하 터널 굴착 시 발생하는 진동을 계측하였다. 본 현장은 매립층, 풍화토, 풍화암, 경암으로 구성되어 있으며, 굴착되고 있는 터널은 지하 40.0m 깊이에 위치하였다(Fig. 1(a)). 실제 계측기 설치 위치는 발파지점 중심부로부터 20.0m 떨어진 지점(Fig. 1(a)의 녹색 점)에 설치하였다. Fig. 1(b)는 4일간 계측된 진동



(a) The information about site A (ground, tunnel depth, blasting pattern etc.)



(b) The results of vibration velocity

Fig. 1. The field blasting vibration measurement

속도를 보여주고 있다. 진동 측정 장치는 3축 진동센서를 이용하여 실시간 peak점을 측정 가능한 제품이며, 국내공인기관의 교정을 받은 제품을 사용하였다. 이후 해석 또한 이를 고려하여 일정한 이격거리(Fig. 1(a)의 노란색 점)를 갖고 각 발파공에 대해 X, Y, Z 방향 발파 조합으로 해석을 실시하였다. 실제 현장에서 계측된 최대진동치는 0.11cm/sec이며, MOLIT(2016)에서 규정하고 있는 문화재와 같은 진동 예민 구조물에 대한 허용치나 피해가 발생하지 않는다고 보는 일본 허용치 기준보다 작은 값이 측정되었다.

### 3. 수치해석을 이용한 발파 진동 영향 검토

동일한 현장 지반 및 발파 조건과 계측 결과를 기반으로 역해석을 실시하였다. 해석은 유한차분법 기반의 수치해석 프로그램인 FLAC 3D를 사용하였으며, FLAC 3D는 운동방정식을 매시간 단계마다 적분하여 해를 구하는 방식으로 시간 이력에 따른 거동 해석에 용이하다 (Itasca, 2017). 수치해석 시 X, Y, Z 모든 방향에서 발파로 인한 반사파의 영향이 없도록 하기 위해 점성경계 (quiet boundary)로 경계조건을 설정하였으며, Fig. 2는 FLAC 3D 프로그램으로 모델링한 지반 및 발파 패턴을 보여주고 있다.

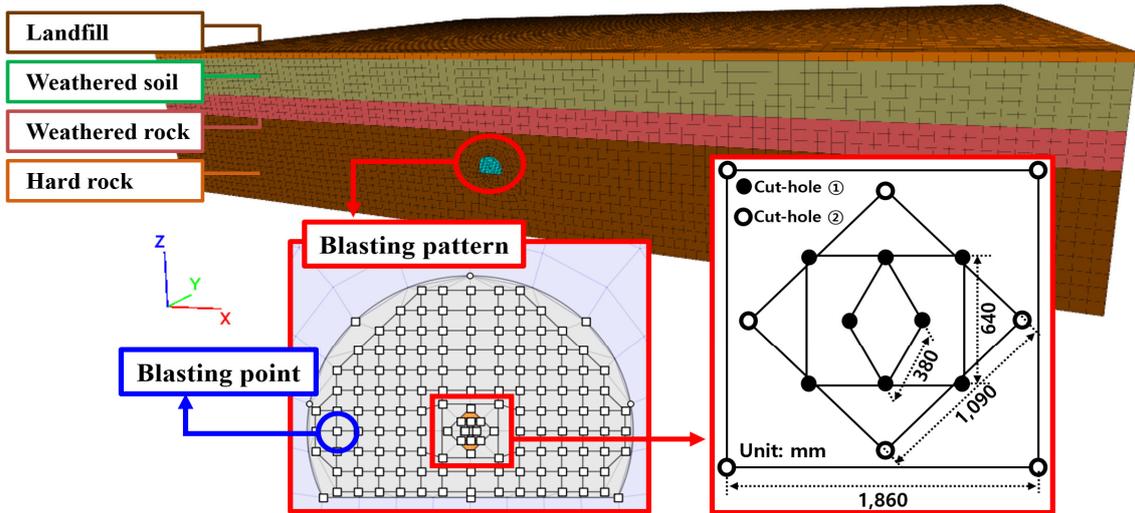


Fig. 2. Modeling of 3D numerical analysis

### 3.1 지반 구성모델 및 물성치 산정

발파 해석을 수행하기 위해 다양한 수치해석 모델이 존재하고 각 모델에 따라 계산에 필요한 다양한 지반정보가 필요하다. 하지만 현장지반조사를 통해 얻을 수 있는 지반정보는 한정적이며, 최소한의 지반물성치를 통해 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 모델로 Mohr-Coulomb 모델을 일반적으로 해석에 많이 사용한다. 본 연구에서는 이러한 이유로 각 지층에 대해 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다(Park et al., 2010). 지반조사 결과 보고서를 참고하여 지층 구성 및 지하수위에 대한 정보를 얻고, 해당 지층에 대한 물성치는 기존 문헌을 참고하여 Mohr-Coulomb 모델에 필요한 물성치를 입력하였다(Oh, 2008., Joen et al., 2007., Sung et al., 2013). Table 3은 해석에 적용한 물성치를 나타내고 있다.

Table 3. The material properties of the ground

Classification	Model	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kN/m <sup>3</sup> )	Angle of shearing resistance (°)	Young's modulus (kN/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio
Landfill	M-C	18	0	31	13,000	0.3
Sedimentary layer	M-C	17	0	33	17,000	0.35
Weathered soil	M-C	19	15	31	35,000	0.3
Weathered rock	M-C	20	30	35	150,000	0.26
Soft rock	M-C	23	140	32	250,000	0.2
Normal rock	M-C	26	790	37	7,800,000	0.25
Hard rock	M-C	26	1,500	41	13,000,000	0.22

Table 4. The properties of explosives

Classification	V <sub>e</sub> (cm/sec)	ρ <sub>e</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter (mm)
Emulsion	5,700 ~ 5,900	1.1 ~ 1.3	25 ~ 36

### 3.2 발파하중 산정

해석에 적용한 발파하중을 산정하기 위해 식 (1)과 같이 Hino(1959)의 계산식을 사용하였으며, 에멀전계 화약에 대한 특성과 현장의 각 공에 대한 장약량 조건 (0.75kg~2.80kg)을 적용하여 발파하중을 계산하였다(Table 4). 계산된 발파하중은 식 (2)를 사용하여 전색에 대한 발파하중 보정을 실시하였으며, 보정된 발파하중과 식 (3)의 Starfield and Pugliese(1968) 계산식을 이용해 등가 발파하중(P')을 계산하였다. 심발공 1, 2와 확대공에 대한 시간이력곡선은 Fig. 3과 같으며, 각 심발공과 확대공에 대한 장약량 및 등가환산 발파하중은 Table 5와 같다. 산정된 발파하중은 Fig. 2의 패턴과 같이 심발공1, 심발공2, 확대공 순서로 0.001초 간격으로 발파되었다. 이 때 적용된 등가주파수와 지반의 감쇠비는 기존 문헌

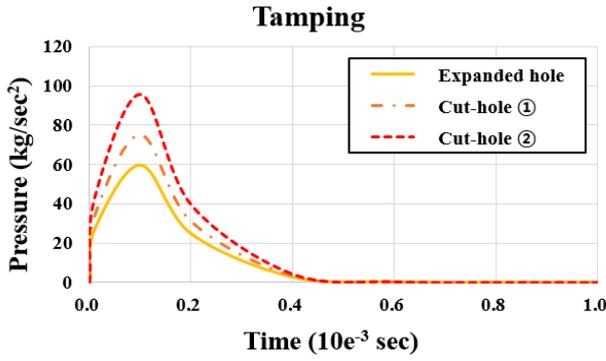


Fig. 3. Time series of blast loading

Table 5. Charge weight and blasting load

Classification	Charge weight (kg)	Blasting load (kg/cm <sup>2</sup> )
Cut-hole ①	2,20	150,58
Cut-hole ②	2,80	191,65
Expanded hole	0,75	119,78

을 참고하여 각각 100Hz, 5%가 적용되었다(Jeon et al., 2007, Ahn et al., 2014, Kim et al., 2015).

$$P_D = 0.000424 \cdot V_e^2 \cdot P_e (1 - 0.543\rho_e + 0.193\rho_e^2) \quad (1)$$

( $P_D$  : Blasting load (kg/cm<sup>2</sup>),  $V_e$  : Average velocity of explosion (m/sec),  $\rho_e$  : Average of specific gravity (g/cm<sup>3</sup>))

$$P_A = (2 \cdot \rho_a \cdot C_a) / (\rho_a \cdot C_a + \rho_a \cdot V_e) \cdot P_D \quad (2)$$

( $\rho_a$  : Tamping density of sand (g/cm<sup>2</sup>),  $C_a$  : Velocity of shock wave (sand) (m/sec))

$$P' = P_a \cdot W \cdot 2\pi \cdot \text{Diameter of boring} / \text{Length around the blast hole} \quad (3)$$

( $W$  : Explosive charges (kg))

$$P(t) = 4 \cdot P_{\text{exp}} (-B \cdot t / \sqrt{2}) - \exp(-\sqrt{2} \cdot B \cdot t) \quad (4)$$

( $P(t)$  : Pressure according to time  $t$  (kg/cm<sup>2</sup>),  $B$  : Constant for load (16,338),  $t$  : Time (0.06  $\mu$ sec))

### 3.3 현장 계측에 대한 역해석 결과

Fig. 4는 GTX-A 노선 중 Site A에 대한 역해석 결과이다. Y축은 진동속도를 나타내고 있으며, X축은 Fig.

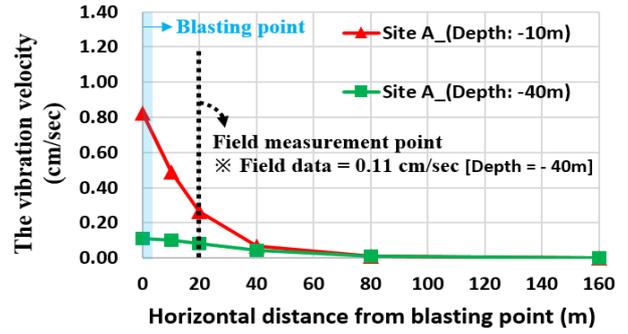


Fig. 4. The vibration velocity according to horizontal distances (Site A)

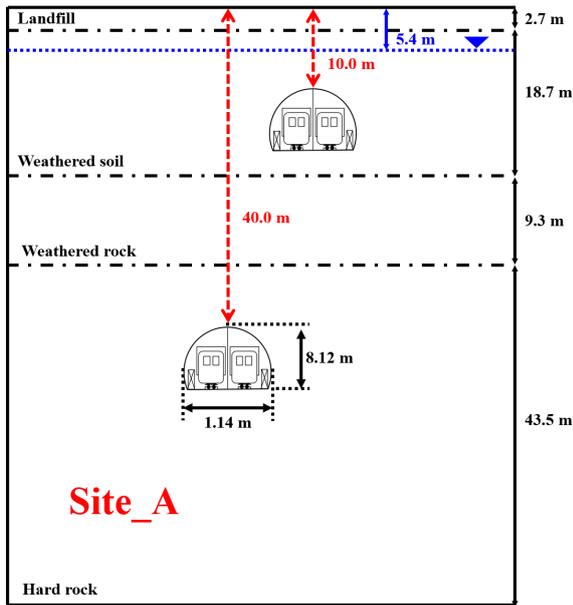
1(a)의 측정 지점(녹색 점, 노란색 점)과 같이 발파지점 직상부 지표면(Horizon distance from blasting point = 0m)으로부터 수평으로 떨어진 지점을 나타내고 있다. 지반 물성치 및 발파 조건은 앞선 현장계측 조건과 동일하게 적용하였으며, 추가적으로 -10.0m 이하의 낮은 심도에서의 터널 굴착을 해석하였다. 그래프에서 녹색 선은 굴착심도 -40.0m일 때의 결과 값이며, 붉은색 선은 -10.0m 심도에서 발파 시 결과이다. Fig. 1(b)의 현장에서 측정된 최대 진동 속도와 Fig. 4의 굴착심도 -40.0m (녹색 선)일 때 수평으로 20.0m 떨어진 지점에서의 측정결과(X축 20)가 유사한 결과를 보이며, 굴착 심도가 -10.0m 일 때, 해당지점의 진동속도가 약 0.26cm/sec로 -40.0m의 경우보다 두 배 이상 높은 수치를 보였다. 국내 기준과 비교하면 굴착심도 -40.0m에서 굴착하는 경우 모든 지점에서 0.2cm/sec 이하의 진동속도가 측정되거나 굴착심도가 -10.0m인 경우 직상부, 이격거리 10.0m, 20.0m에서 모두 문화재 및 진동예민구조물에 영향을 미치는 정도의 범위에 속하여 대심도 굴착이 지표면에서의 진동 영향을 크게 감소시키는 것으로 보인다. 따라서 대심도에서는 0.2cm/sec 이하의 진동속도가 측정되기 에 최대한 직상부에서 계측을 실시해야하며, 이보다 심도가 얕은 중심도에서 굴착하는 경우 직상부로부터 수평 이격거리 40.0m 이내로 심도에 따라 영향 범위를 고려하여 지반진동 측정 위치에 대한 범위가 다르게 적용되어야함을 확인하였다.

### 3.4 추가 현장에 대한 수치해석

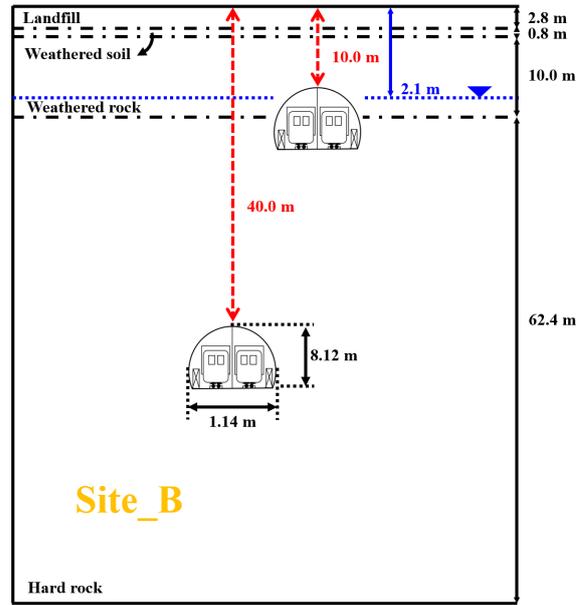
현장계측과의 비교를 위해 GTX-A 노선 중 한 곳(Site A)을 역해석한 것에 외에 추가로 GTX-A 공사 현장 세 곳(Site B, C and D)에 대해 수치해석을 실시하였다. 지

반 물성치는 앞선 해석과 마찬가지로 각 현장의 지반조사 보고서와 기존 문헌을 참고하였으며, 발파 및 계측 방법 또한 앞선 해석과 동일하게 적용하였다. Fig. 5는 각 현장에 대한 굴착심도, 지층 및 지하수위 조건을 나타내고 있다. Fig. 6은 Fig. 4와 마찬가지로 Site B, C, D에 대한 수치해석결과를 나타내고 있다. Site B, C, D 모두 대심도에서 발파를 진행하는 경우 직상부 및 수평이격거리에 따라 모든 구간에서 0.2cm/sec 보다 낮은 수치가 발생하였다. 이는 문화재 및 진동 예민구조물에 영

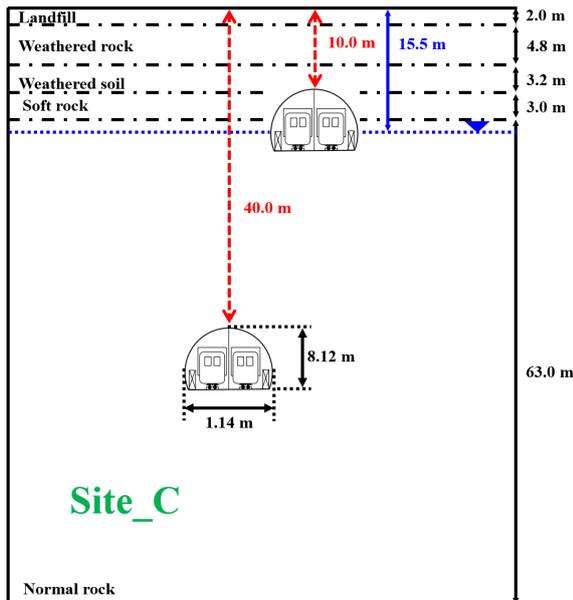
향을 미칠 수 있는 국내 기준 범위에 속하지 않기에 대심도 굴착 시 최대한 직상부에서 계측해야한다. 이와 반대로 -10.0m 와 같이 얇은 심도에서 터널 굴착 시 Site B, C의 직상부에서는 1.0cm/sec 이상의 진동치가 발생하였으며, Site C의 경우 직상부에서 수평으로 20.0m 떨어진 지점에서도 0.3cm/sec 이상의 수치가 발생함을 보여 진동 예민 구조물에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이는 Fig. 5에 나타낸바와 같이 Site B, C는 굴착심도가 -10.0m일 때 지층조건이 암반층이며, Site C의 경우 연



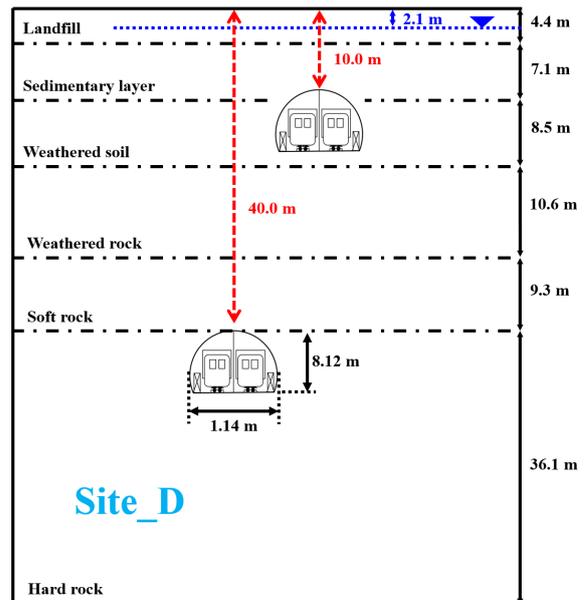
(a) Site A



(b) Site B



(c) Site C



(d) Site D

Fig. 5. The information about site A, B, C, D

암으로 보다 진동에 영향을 더 받는 것으로 보인다. 따라서 같은 굴착심도를 갖더라도 지층조건에 따라 진동의 영향 범위가 달라짐을 확인하였다. 하지만 모든 현장에서 수평이격거리가 40.0m 떨어진 지점에서는 터널 굴착 심도, 지반 조건 등의 영향을 크게 받지 않은 유사한 진동 결과 값을 보인다. 따라서 본 결과로 보아 “발파원으로부터 가장 근접한 구조물 기초 부위에서 측정하고 여건상 불가능한 경우 이에 근접한 지표에서 측

정”한다는 국내 규정에서 근접한 지표는 약 40.0m 이내로, 이를 고려하여 계측을 실시하는 것이 유의미한 측정 값을 얻을 수 있을 것으로 보인다. Fig. 7은 굴착심도 -10.0m일 때 발파지점의 직상부 지표면에서 굴착방향(Y축)과 수평방향(X축) 이격거리에 따라 발파진동의 영향을 나타내고 있다. 본 결과는 각 방향에 대해 이격거리 0.0m(직상부), 10.0m, 20.0m, 40.0m의 결과를 보여주고 있으며, 국내기준과 비교하여 zone A(진동 예민 구

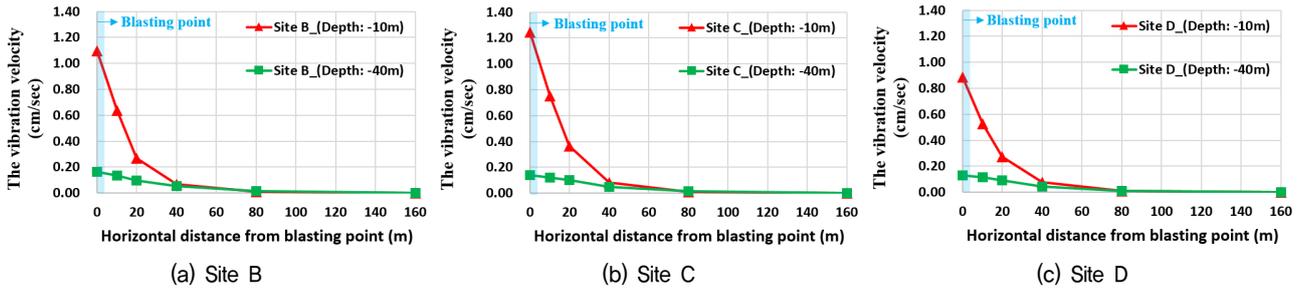


Fig. 6. The vibration velocity according to horizontal distances (Site B, C, D)

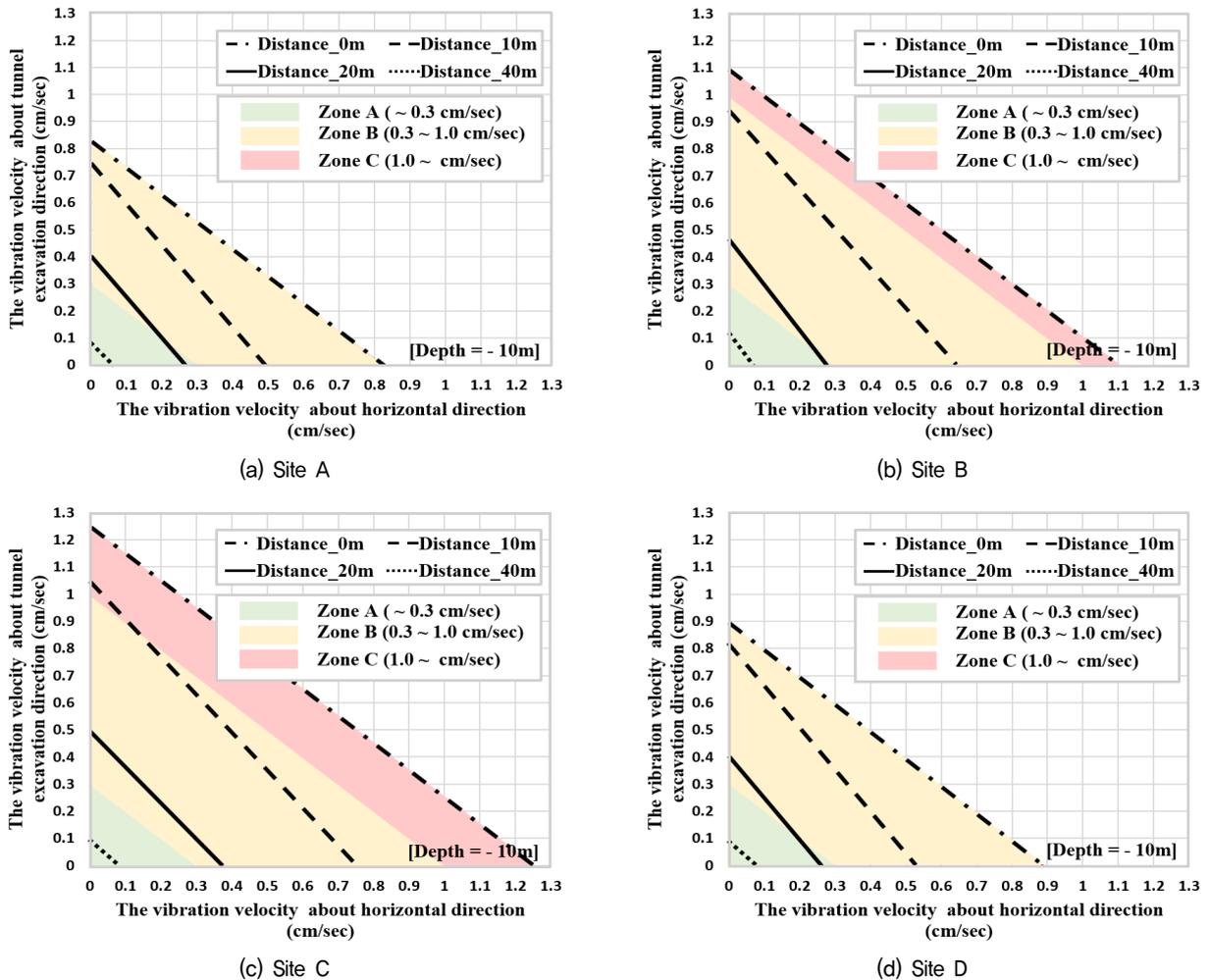


Fig. 7. The influence range of blasting vibration about tunnel excavation and horizontal direction (Comparison with domestic standards, tunnel depth = 10.0m)

조물 또는 문화재에 영향을 미치는 범위 이하), zone B (조적식 벽체와 목재천장을 가진 구조물에 영향을 미치는 범위 이하), zone C(지하 기초와 콘크리트 슬래브를 갖는 조적식 건물에 영향을 미치는 범위 이하)로 나누었다. Fig. 8과 같이 굴착심도가 -40.0m인 경우 지표면 모든 범위가 zone A에 속하는 것과 달리 굴착심도 -10.0m인 경우 최대 zone C의 기준까지 진동속도가 발생함을 알 수 있다. 같은 -10.0m 굴착 심도에서도 Site A, D는 최대 Zone B 기준이나 Site B, C는 최대 Zone C에 해당한다. 이는, Site B, C가 암반층에 해당되는 얇은 심도에서 굴착되어, 진동의 전달이 더 잘되기 때문인 것으로 판단된다. 이와 마찬가지로 굴착 심도의 -40.0m일 때, 모든 Site 측정지점에서의 결과값은 Zone A의 영역에 속하지만 암반층의 깊이에 따라 차이가 있는 것으로 보인다. 하지만 이러한 굴착심도, 지층조건에 상관없이 굴착방향 수평이격거리가 40.0m 떨어진 지점에서의 진동속도 값

은 모두 Zone A에 해당하여 지표면에 있는 구조물에 미치는 영향이 없는 것으로 예측된다. 따라서 앞선 결과와 마찬가지로 발파원 직상부로 부터 40.0m 이상 떨어진 지점에서 측정하는 것은 큰 의미가 없는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구는 지하 발파로 인한 진동을 지표면에서 계측 시 “대상 시설물에 대한 지반진동은 발파원으로부터 가장 근접한 구조물 기초 부위에서 측정하고 여건상 이것이 불가능한 경우에는 이에 근접한 지표에서 측정할 수 있다”는 규정에 대해 근접한 지표에 대하여 보다 명확한 제시를 위해 GTX-A 노선 현장 상부에서 진동을 계측하였다. 또한 이를 역해석 하였으며, 추가적인 다른 현장 대해 수치해석하여 국내·외 진동 허용치와 비교 분석하였다.

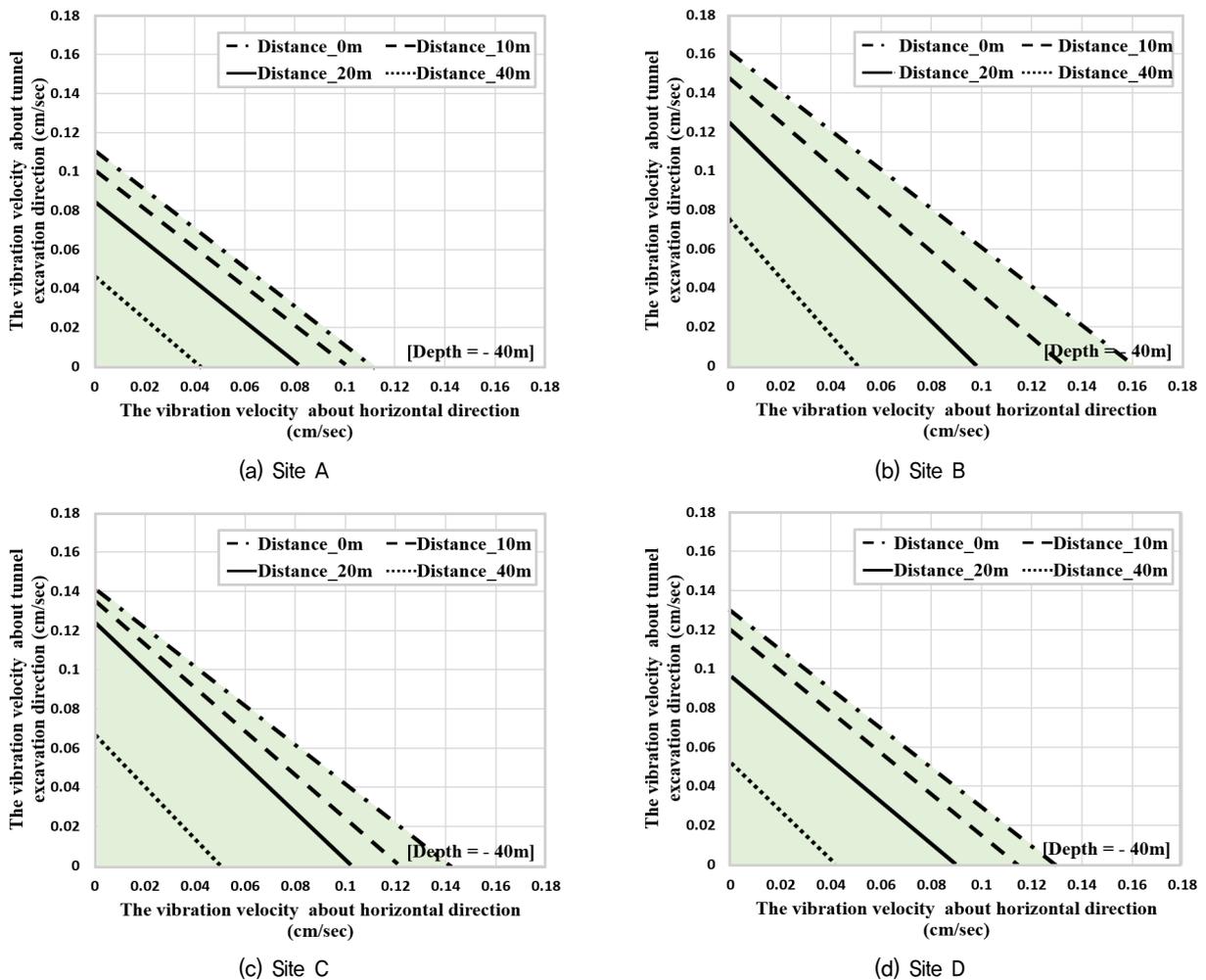


Fig. 8. The influence range of blasting vibration about tunnel excavation and horizontal direction (Comparison with domestic standards, tunnel depth = 40.0m)

- (1) GTX-A 노선 현장 상부(발파원 직상부에서 20m 떨어진 지점)에서 진동을 계측한 결과 0.11cm/sec의 진동속도가 발생했으며, 이와 동일한 지반, 발파조건으로 역해석한 결과 발파원 직상부에서 유사한 발파진동 값이 발생함을 확인하였다. 이는 문화재와 같은 진동 예민 구조물에 적용되는 허용치 보다 낮은 값으로 실제 현장에서는 규정에 따른 안전한 발파가 이루어졌다고 볼 수 있다.
- (2) 실제 계측 결과와 역해석한 결과를 바탕으로 GTX-A 노선 다른 3곳에 대해 추가적으로 수치해석을 실시하였다. 타 구간 해석 결과 또한 대심도(굴착심도 = -40.0m) 굴착 시 모든 측정 지점에서 0.20cm/sec 보다 작은 진동치가 측정되었다. 따라서 대심도 굴착의 경우 진동 계측의 범위는 최대한 직상부에서 측정해야 유의미한 결과를 얻을 수 있을 것으로 보인다.
- (3) 동일한 현장(Site A, B, C, D)에 대해 중심도(굴착심도 = -10.0m) 굴착에 대한 수치해석을 실시한 결과 최대 1.24cm/sec로 “조적식 벽체와 목재천장을 가진 구조물”에 영향을 줄 수 있는 수치인 1.0cm/sec 보다 큰 진동치가 발생하였다. 따라서 터널 심도에 따라 “근접한 지표”에 대한 계측 위치 선정이 달라져야 할 것으로 보인다.
- (4) 지표면에서 측정되는 발파진동을 굴착방향과 수평방향으로 나누어 해석한 결과 동일한 이격거리일 때 굴착방향에서 진동의 영향이 더 큰 것을 확인하였다. 하지만 이격거리가 40.0m 이상인 경우 방향과 지층 조건에 상관없이 진동속도가 0.1cm/sec 이하로 측정되었다. 이는 국내 최소 기준인 문화재와 같은 진동 예민구조물에 대한 규정치 보다 낮은 값으로 국내 규정에서 “발파원으로부터 가장 근접한 구조물 기초 부위에서 측정하고 여건상 불가능한 경우 이에 근접한 지표에서 측정”에서 근접한 지표는 발파원 직상부로부터 40.0m 이내, 굴착방향으로 측정하는 것이 보다 유의미한 측정결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 같은 중심도에서 굴착하였지만 Site A, D는 토사층에서 Site B, C는 암반층에서 굴착함에 따라 발파진동의 영향이 달라짐을 확인하였다. 암반층에서도 보다 조밀한 연암에서 발파하는 경우 지표면에 미치는 발파진동의 영향이 커짐으로 동일 굴착심도라도 지층 조건에 따라 발파진동의 크기 및 영향 범위가 달라지는 경향을 보였다. 또한 대심도의 경우 암반

층의 깊이에 따라 지표면에 미치는 진동의 영향이 달라지는 것으로 보인다. 따라서 추 후 단일지반으로 모델링하여 지반조건 차이에 따른 진동영향을 분석하는 연구를 수행할 계획이며, 이를 통해 지반 조건에 따른 발파진동의 영향범위를 보다 정확하게 산정할 수 있을 것으로 예상된다.

- (6) 본 연구는 비교를 위해 얇은 굴착 심도와 깊은 심도 모두 동일한 발파조건을 가지고 수치해석을 실시하였다. 실제로는 얇은 심도에서는 보다 진동을 저감할 수 있는 방법으로 굴착을 실시하기에 더 작은 진동속도가 발생할 것으로 보이며, 이에 따라 본 논문에서 제시한 이격거리보다 근접한 위치에서 진동 측정이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구는 발파원과 지표면까지의 균질한 지반에 대해서 수치해석을 실시하였기에 지하공동, 불연속면 등 지반이 양호하지 못한 경우에 대한 연구를 추가적으로 실시할 계획이다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원(과제명: 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: 22UUTI-C157788-03)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Jeon, S.S., Jang, Y.W., and Jung, D.H. (2007), “Estimation of the Blasting Distance Satisfying Allowable Peak Particle Velocity - Analytical & Numerical Analysis Approach”, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol.7, No.1, pp.39-46.
2. Jung, H.S., Jung, K.S., Mun, H.N., Chun, B.S., and Park, D.H. (2011), “A Study on the Vibration Propagation Characteristics of Controlled Blasting Methods and Explosives in Tunnelling”, *J. of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.12, No.2, pp.5-14.
3. Ko, Y.H. (2023), “Experimental and Numerical Study on the Mitigation of High Explosive Blast using Shear Thickening based Shock-Absorbing Materials”, *J. of the Explosives & blasting*, Vol.41, No.3, pp.1-12.
4. You, K.H., Song, M.K., Lee, H.K., and Kim, N.J. (2023), “Prediction and Determination of Correction Coefficients for Blast Vibration Based on AI”, *J. of the Explosives & blasting*, Vol.41, No.3, pp. 26-37.
5. MOLIT (2002), “Blasting noise review of vibration tolerance standards”, Office of the Inspector General of the Ministry of Construction and Transportation, Korea, pp.9-29.
6. MOLIT (2016), “Tunnel Standard Specification, Human Culture

- Arirang”, Korea, pp.1-11.
7. Moon, H.K. and Shin, J.H. (2008), “Effect of Blast-induced Vibration on a Tunnel”, *J. of the Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.10, No.3, pp.207-219.
  8. Son, M.R., Hong, D.P., Kwon, O.C., Jung, Y.K., Hwang, Y.C., and Park, D.H. (2014), “Study on the Allowable Limit of Blasting-induced Vibration for Road Structures and Facilities”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.12, pp.27-40.
  9. Kong, S.M., Choi, S.I., Kim, Y.B., Noh, W.S., Kim, C.Y., and Lee, S.W. (2022), “A Study on the Effect of Blasting Vibration and the Optimal Blasting Offset according to the Depth of Tunnel”, *J. of the Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.24, No.6, pp.483-494.
  10. Itasca Consulting Group Inc. (2017), “FLAC 3D 6.0 manual: examples (An excerpt from FLAC3D help)”, Itasca Consulting Group Inc.:St. Paul, Minneapolis, United States, pp.39-52.
  11. Park, D.H., Shin, J.H., and Yun, S.U. (2010), “Seismic Analysis of Tunnel in Transverse Direction PartII: Evaluation of Seismic Tunnel Response via Dynamic Analysis”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.6, pp.71-85.
  12. Oh, W.K. (2008), “A Study on the Ground Reinforcement for Constructability of Tubular Roof Construction Method”, Master Thesis, Hanyang University, pp.45.
  13. Jeon, S.S., Kim, D.S., and Jang, Y.W. (2007), “Stability Assessment of Concrete Lining and Rock Bolts of the Adjacent Tunnel by Blast-induced Vibration”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.10, pp.33-45.
  14. Sung, J.H., Kim, Y.S., and Shin, B.G. (2013), “Analysis on Impact Factors of Open-cut Type Excavation Work using Numerical Analysis Method”, *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol.12, No.3, pp.43-53.
  15. Hino, K. (1959), “Theory and Practice of Blasting”, Nippon Kayaku Co., Ltd., Tokyo, Japan, pp.1-11.
  16. Starfield, A.M. and Pugliese, J.M. (1968), “Compression Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charges: A Comparison between a Computer Model and Field Measurements”, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol.5, No.1, pp.65-77.
  17. Ahn, J.K., Park, D.H., Shin, Y.W., and Park, I.J. (2014), “Generation of Blast Load Time Series under Tunneling”, *J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol.16, No.1, pp.51-61.
  18. Kim, N.Y., Ryu, J.H., Ahn, J.K., Park, D.H., Son, M.R., and Hwang Y.C. (2015), “Estimation of Attenuation Relationship Compatible with Damping Ratio of Rock Mass from Numerical Simulation”, *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.4, pp.45-55.

Received : November 15<sup>th</sup>, 2023

Revised : April 16<sup>th</sup>, 2024

Accepted : April 16<sup>th</sup>, 2024